



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

CALIBRACIÓN DE OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS MEDIANTE ALTIMETRÍA SATELITAL E IMPACTO EN ASPECTOS DE INGENIERÍA DE COSTAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TOMÁS ANDRÉS CUEVAS LÓPEZ

PROFESOR GUÍA
CÉSAR GUZMÁN MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
YARKO NIÑO CAMPOS
ANDRÉS PUELMA MÜLLER

SANTIAGO DE CHILE
2016

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniero civil
POR: Tomás Cuevas López
FECHA: 13/10/2016
PROF. GUÍA: César Guzmán Mardones

CALIBRACIÓN DE OLEAJE DE AGUAS PROFUNDAS MEDIANTE ALTIMETRÍA SATELITAL E IMPACTO EN ASPECTOS DE INGENIERÍA DE COSTAS

El oleaje *offshore*¹ puede ser caracterizado por modelos de generación de oleaje a partir de información de viento atmosférico (*hindcasting*²). Los resultados obtenidos deben ser calibrados a través de registros de oleaje para brindarles mayor utilidad en ingeniería. La manera más práctica de obtener una base de datos para realizar la calibración es mediante mediciones de olas con altimetría satelital. El mayor desafío consiste en asociar los datos altimétricos de olas con las salidas de modelos de *hindcasting* globales, ya que la probabilidad de que el satélite pase por el punto exacto y en el mismo instante de un dato simulado, es muy baja. Dado lo anterior, se deben definir ventanas temporales y espaciales en las cuales se puedan asociar pares de datos de ambas fuentes de información.

El objetivo general del presente trabajo es generar una serie de metodologías de calibración de oleaje de aguas profundas mediante altimetría satelital, y estudiar el impacto de éstas en proyectos de ingeniería de costas desarrollados en Chile. Para lograr lo anterior se comenzó por desarrollar una herramienta de calibración de oleaje similar a la que realizan las firmas de ingeniería que venden este tipo de información. Luego se desarrolló una variación de lo anterior donde se pudo verificar si el oleaje de tormenta y de operación, y si los oleajes con diferentes direcciones, y de diferentes periodos requiere ajustes distintos. Se estudió el efecto de estas metodologías en proyectos relacionados con oleaje operacional y en el diseño de estructuras expuestas al oleaje.

El trabajo comenzó con una revisión bibliográfica sobre calibraciones de oleaje con satélites. Luego se accedió a las fuentes de información de oleaje medida con satélites y modelada para generar bases de datos con las cuales trabajar. Además, se confeccionaron rutinas de programación para generar climas de oleaje mediante los diferentes métodos de calibración. Finalmente, mediante técnicas estadísticas, se generaron familias de climas de oleaje de aguas profundas. Éstas fueron evaluadas en proyectos de ingeniería de costas.

¹Aguas profundas.

²Modelo que usa datos históricos como entrada.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer al equipo hidráulico de PRDW por toda la ayuda prestada a lo largo del trabajo. En especial, a César Guzmán, Andrés Puelma y Benjamín Carrión; por su excelente disposición y por todo el tiempo dedicado.

A las instituciones que me proporcionaron los datos para poder realizar el trabajo, al Servicio Oceanográfico de la Armada (SHOA) por la información de boyas; y al proyecto GlobWave, a través del cual obtuve la información satelital.

Quiero agradecer a todos los amigos que hice a lo largo de los 6 años (y un poco más), a los de plan común, civil e hidráulica; por toda la buena onda, viajes, campeonatos de fútbol, bienvenidas, despedidas, etc.

Por último, a mi familia, tanto de Santiago como de Concepción; muchas gracias por el apoyo a lo largo de toda la carrera.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Metodología	2
1.4. Organización del informe	3
2. Revisión bibliográfica	4
2.1. Definiciones asociadas al oleaje	4
2.1.1. Ola	4
2.1.2. Altura de ola	4
2.1.3. Periodo	5
2.1.4. Espectro de oleaje	5
2.2. Oleaje de aguas profundas	6
2.2.1. Generación de oleaje	6
2.2.2. Teoría lineal de oleaje	7
2.2.3. Teorías no lineales de oleaje	8
2.3. Modelos de generación y propagación de oleaje	10
2.4. Medición de oleaje en aguas profundas	11
2.4.1. Técnicas in situ	11
2.4.2. Técnicas de medición remotas	12
2.5. Proyecto GlobWave	14
2.6. Calibración de oleaje estándar en la industria	15
2.7. Oleaje de aguas someras	16
3. Fuentes de información	18
3.1. Información satelital	18
3.2. Información oleaje modelado NCEP	19
3.3. Preprocesamiento de la información	20
3.3.1. Variables satelitales 1D	20
3.3.2. Variables satelitales 3D	22
3.3.3. Oleaje modelado	25
4. Metodologías de calibración	26
4.1. Filtros	26
4.1.1. Filtro espacial N°1	26
4.1.2. Filtro espacial N°2	28
4.1.3. Filtro por calidad	28
4.1.4. Filtro espacial N°3	28
4.1.5. Filtro temporal N°1	31
4.1.6. Filtro temporal N°2	32
4.1.7. Resumen filtros	34
4.2. Calibración con punto más cercano en el espacio (PMC)	35
4.2.1. Calibración de la altura de ola	35
4.2.2. Calibración del periodo	40
4.2.3. Calibración de la dirección de propagación del oleaje	43
4.3. Calibración con dato promedio del track (PROM)	45
4.4. Calibración paramétrica (CP)	47

5. Validación de metodologías	50
5.1. Validación del clima de oleaje de Iquique	50
5.2. Validación del clima de oleaje de Valparaíso	51
6. Implementación de calibraciones en proyectos de ingeniería	52
6.1. Extensión rompeolas, puerto de Arica	52
6.2. Estudio de barco atracado en Terminal GNL, Quintero	53
6.3. Cálculo del potencial de oleaje, Puerto de San Antonio	55
6.4. Esfuerzos sobre pilotes en muelle de descarga de carbón, Coronel	57
7. Comentarios y conclusiones	60
8. Bibliografía	63
Anexo A. Radio ventana espacial	67
Anexo B. Ventana temporal	67
Anexo C. Calibración con punto más cercano en el espacio	68
Anexo D. Calibración con dato promedio del track	70
Anexo E. Calibración paramétrica	74
Anexo F. Regresión por cuantiles	75
Anexo G. Propagación de oleaje	76
Anexo H. Extensión rompeolas, puerto de Arica	77
Anexo I. Esfuerzos sobre pilotes en muelle de descarga de carbón, Coronel	78

Índice de tablas

2.1. Satelites disponibles en servidores de GlobWave.	15
3.1. Variables satelitales usadas en el análisis.	18
3.2. Ubicación nodos de aguas profundas.	19
3.3. Calidad mediciones satelitales.	21
3.4. T_{m01} , T_P , D_m , y D_P para espectros medidos frente a Mejillones.	24
4.1. Tamaño de la muestra satelital según radio de la ventana espacial.	27
4.2. Profundidad menor en ventana espacial de mayor radio (1°).	27
4.3. Tamaño de la muestra satelital en función de la calidad de la medición, Valparaíso.	28
4.4. Formato DF con pares asociados.	31
4.5. Resumen de filtros utilizados.	34
4.6. Resumen resultados calibración paramétrica, Valparaíso.	49
5.1. Ubicación boya Iquique.	50
5.2. Ubicación boya Valparaíso.	51
6.1. Rango de resultados en el diseño de rompeolas, Arica.	53
6.2. Rango de resultados en no disponibilidad de barco atracado, Mejillones.	54
6.3. Potencial de oleaje, puerto de San Antonio.	55
6.4. Oleaje extremo, Coronel.	58
6.5. Esfuerzo sobre pilotes, muelle de carbón Coronel.	60

Índice de figuras

2.1. Definición ola.	4
2.2. Random-phase/amplitude model.	6
2.3. Propiedad μ transportada en dirección x a través de un volumen de control.	7
2.4. Perfil de ola de Stokes de segundo orden.	9
2.5. Rango de aplicabilidad de las teorías de oleaje.	10
2.6. Radar altimétrico sobre un satélite.	13
3.1. Número de pasadas satelitales en una ventana espacial de 1° , Coronel.	21
3.2. Serie de tiempo de la H_s medida frente a Valparaíso en una ventana espacial de 1°	22
3.3. Serie de tiempo de la H_s medida frente a Valparaíso en una ventana espacial de 1° sin valores atípicos (outliers).	22
3.4. Pandas Panel utilizado en variable polSpec.	23
3.5. Espectros medidos en una ventana de 1° frente a Mejillones.	24
3.6. Series de tiempo modeladas en Iquique.	25
4.1. Cobertura espacial Geosat en 1985, y Jason-2 en 2015.	26
4.2. Ventanas espaciales, Arica.	27
4.3. Selección de la medición más cercana espacialmente al nodo.	29
4.4. Variación de la altura de ola medida dentro de la ventana espacial, Valparaíso.	30
4.5. Metodología de emparejamiento de datos, parte n°1.	31
4.6. R^2 en función del desfase horario, Mejillones.	33
4.7. Series de oleaje medido y modelado frente a Valparaíso.	35
4.8. Familia de ajustes lineales obtenidos con metodología PMC, Valparaíso.	36
4.9. Distribución de los puntos en regresión lineal, metodología PMC, Valparaíso.	37
4.10. Ajuste lineal según distancia entre medición y nodo, Valparaíso. Metodología PMC.	38
4.11. Altura de ola calibrada con metodología PMC, Valparaíso.	38
4.12. Calibración con familias de ajustes lineales mediante metodología PMC, Valparaíso.	39
4.13. Porcentaje de no excedencia con metodología PMC, Valparaíso.	40
4.14. Periodo modelado y periodo calculado con “Two piece model”, Valparaíso. Metodología PMC.	41
4.15. Ajuste lineal de periodos RAR, Valparaíso. Metodología PMC.	41
4.17. Ajuste lineal para periodos calculados con información SAR, Valparaíso. Metodología PMC.	42
4.16. Serie de periodos modelados y mediciones SAR, Valparaíso. Metodología PMC.	42
4.18. Serie de direcciones modeladas y calculadas, Valparaíso. Metodología PMC.	43
4.19. Serie de direcciones modeladas y medidas, Valparaíso. Metodología PMC.	44
4.20. Ajuste lineal direcciones calculadas con información SAR, Valparaíso.	44
4.21. Familia de ajustes lineales obtenidos con metodología PROM, Valparaíso.	45
4.22. Calibración con familia de ajustes lineales, Valparaíso. Metodología PROM.	46
4.23. Porcentaje de no excedencia obtenido con metodología PROM, Valparaíso.	47
4.24. Esquema funcionamiento calibración paramétrica.	47
4.25. Comparación porcentaje de no excedencia, Valparaíso. Metodologías CP y PROM.	48
5.1. Validación climas de oleaje, Iquique.	50
5.2. Validación climas de oleaje, Valparaíso.	51
6.1. Valores pico sobre umbral de tormenta, Arica.	52
6.2. Ajuste de Weibull clima central, EVA.	53
6.3. Curva límite operación.	54
6.4. Potencial de oleaje, puerto de San Antonio.	56
6.5. Cálculo oleaje extremo, Coronel.	57
6.6. Perfil de ola.	58

6.7. Esfuerzo sobre pilote ubicado en veril -6. 59

1. Introducción

1.1. Motivación

A falta de mediciones continuas, el oleaje offshore o de aguas profundas puede ser obtenido mediante modelos de *hindcasting* o de generación de oleaje a partir de información de viento atmosférico. La información entregada por los modelos de *hindcasting* adquiere mayor valor ingenieril, una vez que es validada mediante la comparación con mediciones de oleaje. Las fuentes de datos de oleaje confiables en aguas profundas son: boyas, mediciones satelitales y mediciones efectuadas por barcos. Los datos de boyas o barcos, en general, son escasos y no presentan una buena continuidad en el tiempo, y muchas veces no son de acceso gratuito. Por otro lado, la información satelital presenta una alta consistencia en el tiempo, desde 1985 (Bosch, 2003). Las mediciones se distribuyen, no de forma homogénea, pero sí a lo largo de todo el mundo, y además la información es accesible y gratuita. Sin embargo, una de las principales dificultades con la información satelital, radica en asociar los datos medidos por los satélites con los datos generados con modelos globales. Esto se debe a que la probabilidad de que el satélite pase por el punto exacto, y al mismo tiempo que el dato entregado por el modelo, es prácticamente nula. Debido a lo anterior, se deben definir ventanas temporales y espaciales para poder generar pares de datos simulados y medidos con los cuales realizar los ajustes lineales.

En proyectos de ingeniería marítima es primordial contar con una buena descripción de las condiciones de oleaje. Las mediciones satelitales combinadas con modelos de vientos atmosféricos han cambiado drásticamente la forma de obtener información sobre el clima de oleaje en aguas profundas (Krogstad and Barstow, 1999). La altimetría es una herramienta útil para medir las características físicas del mar en aguas profundas, donde las condiciones de oleaje son independientes de la profundidad, por lo que la información es utilizada como punto de partida en modelos de propagación de oleaje y en muchas de las aplicaciones en ingeniería de costas. Para determinar la altura de ola, las misiones satelitales miden el tiempo que tarda en ir y volver un pulso de energía hasta la superficie libre del mar. La magnitud y forma de las ondas medidas contienen información acerca de las características de la superficie, la cual puede ser utilizada para obtener datos sobre la altura y el periodo de las olas. A pesar de que para poder producir una base de datos constante y de largo plazo sobre el clima de oleaje a nivel mundial es necesario combinar distintas fuentes de información (Challenor and Cotton, 2002), en el presente trabajo sólo se tratará con datos de altimetría satelital por razones de accesibilidad a los datos y por la gran disponibilidad de éstos. Vale la pena mencionar que, a pesar del gran avance con respecto a las mediciones de la altura de ola mediante satélites, esta variable por sí sola no es una buena forma de describir el estado de mar (Gommenginger et al., 2003). En el presente estudio se considerará la altura, el periodo y la dirección de propagación de las olas, debido a que combinando estos parámetros se puede obtener una descripción del estado de mar útil para proyectos de ingeniería.

Actualmente los datos de oleaje de aguas profundas son obtenidos mediante una combinación de modelos de *hindcasting* y calibraciones con altimetría satelital o con mediciones de boyas. El procedimiento estándar de la industria es utilizar series de tiempo de entre 20 y 40 años (o más) de datos de oleaje ajustados por una sola regresión lineal sin distinguir entre distintos periodos o direcciones de propagación de oleaje. En el presente trabajo se construirán familias de climas de oleaje de aguas profundas a partir de diferentes calibraciones y se evaluarán condiciones de oleaje operacionales y de diseño en proyectos de ingeniería de costas reales desarrollados por PRDW³.

³Empresa de ingeniería de costas con la que se trabajó en conjunto. <http://www.prdw.com/>

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una serie de metodologías de calibración de oleaje de aguas profundas mediante altimetría satelital y evaluar el impacto de ésta en el clima de oleaje local propagado, y en proyectos reales de ingeniería de costas desarrollados en Chile.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar calibraciones de oleaje de aguas profundas mediante altimetría satelital en las cinco bahías seleccionadas.
- Desarrollar una metodología de calibración de oleaje de aguas profundas que permita diferenciar el análisis para oleaje extremo y operación, para oleaje proveniente de diferentes direcciones, y para olas de periodo corto y largo.
- Verificar si datos de tormenta y operacionales de las cinco bahías que se estudiarán están asociados al mismo ajuste.
- Verificar si en las zonas de estudio el oleaje con diferentes periodos responde mismo ajuste.
- Verificar si las olas provenientes de diferentes direcciones hacia los nodos de aguas profundas que se estudiarán están asociadas a ajustes distintos.
- Evaluar si las metodologías de calibración propuestas afectan al diseño de estructuras expuestas al oleaje.
- Estudiar cuál es el efecto de las metodologías de calibración en aspectos operacionales de puertos y energía de oleaje.

1.3. Metodología

Para cumplir los objetivos mencionados, se desarrollará la siguiente metodología:

1. Estudio sobre mediciones de oleaje a partir de altimetría satelital.

Como primera fase del trabajo se realizó una revisión bibliográfica sobre las mediciones de oleaje a partir de altimetría satelital, para así comprender el funcionamiento de las misiones capaces de medir alturas de olas, sus órbitas, la cantidad de datos disponibles, etc. Además se investigó sobre los rangos temporales y espaciales en los cuales es factible obtener información para calibrar oleaje mediante datos medidos por altimetría satelital, reconocer las posibles fuentes de errores, y determinar cuáles características de las olas se pueden medir.

2. Acceso a las fuentes de información.

A continuación, se debió estudiar y trabajar en las fuentes de información satelital y modelada mediante el software WaveWatch III (Tolman et al., 2009). La finalidad de esta etapa es generar una base de datos con un formato determinado y de fácil manejo para ambos tipos de datos.

3. Desarrollo de metodología de calibración de oleaje medido por altimetría satelital.

En esta tercera etapa se trabajó en el desarrollo de las metodologías de calibración de oleaje *offshore* proveniente de modelos de altimetría satelital. Se determinaron y aplicaron diferentes formas de asociar las mediciones a los datos simulados.

4. Generación de una metodología de calibración paramétrica.

Luego de contar con un procedimiento de calibración, se desarrolló un método para refinar las comparaciones diferenciando el análisis para distintas direcciones, periodos, y para condiciones promedio y de tormenta.

5. Implementación de las metodologías de calibración.

En esta etapa se utilizó las rutinas de programación desarrolladas para generar familias de climas de oleaje. Además, se verificó mediante los climas generados por la metodología capaz de refinar el análisis, si acaso el oleaje operacional y extremo, proveniente de diferentes cuadrantes, y de distintas frecuencias, responden al mismo ajuste lineal.

6. Validación de metodologías.

Luego, se buscó validar las metodologías desarrolladas comparando los climas de oleaje generados con mediciones de boyas.

7. Efectos de las metodologías de calibración en el diseño de estructuras expuestas al oleaje y en proyectos de ingeniería asociados a condiciones de oleaje operacional.

En esta etapa se evaluó el efecto de las nuevas familias de ajustes en el diseño de estructuras expuestas al oleaje desarrollados previamente por PRDW. Se realizó el mismo procedimiento para comprobar el efecto en aspectos operacionales de puertos y energía de oleaje. En esta última etapa se comprobó si las metodologías propuestas tienen efectos en proyectos de ingeniería reales ya desarrollados.

1.4. Organización del informe

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica. Se presenta la información necesaria para comprender el proceso en que el oleaje de aguas profundas es medido, y luego manipulado para transformarse en oleaje de aguas someras. Además se presentan conceptos de hidráulica marítima que es necesario conocer para entender el desarrollo del presente trabajo.

Capítulo 3: Fuentes de información. Se describen las fuentes de las que se obtuvo la información necesaria para realizar las calibraciones, y el preprocesamiento que se le realizó a los datos.

Capítulo 4: Metodologías de calibración. Se detallan la metodologías propuestas para calibrar el oleaje offshore mediante mediciones de altimetría satelital, y además se presentan los resultados obtenidos.

Capítulo 5: Validación de metodologías. En este capítulo se comparan los climas de oleajes obtenidos, a partir de las diferentes metodologías, con datos de oleaje medidos mediante boyas.

Capítulo 6: Implementación de las metodologías de calibración en proyectos de ingeniería. En este capítulo se implementan los diferentes climas de oleaje, obtenidos mediante las metodologías de calibración, en proyectos de ingeniería de costas reales desarrollados previamente por PRDW.

Capítulo 7: Comentarios y conclusiones. Se discute la validez y aplicabilidad de los métodos propuestos, y se concluye con respecto a los objetivos de la investigación realizada.

2. Revisión bibliográfica

2.1. Definiciones asociadas al oleaje

El oleaje se manifiesta como una oscilación de la superficie libre del mar en el tiempo en un determinado punto. Sin pérdida de generalidad, se puede considerar que la superficie libre del mar es perfectamente lisa y horizontal, y se mueve de manera aleatoria en la vertical. Vale la pena mencionar que este no es el caso real, ya que sólo por observaciones se sabe que el oleaje es un movimiento de la superficie libre del océano en 3 dimensiones.

2.1.1. Ola

Para poder definir de manera precisa las características de una ola, es necesario mencionar la diferencia entre éstas y la elevación del nivel del mar. La elevación instantánea de la superficie libre relativa a algún nivel de referencia. En este mismo intervalo, una ola corresponde a la curva descrita por la elevación de la superficie libre en función del tiempo entre dos pasos ascendentes o descendentes por el nivel de referencia (ver Fig. 2.1).

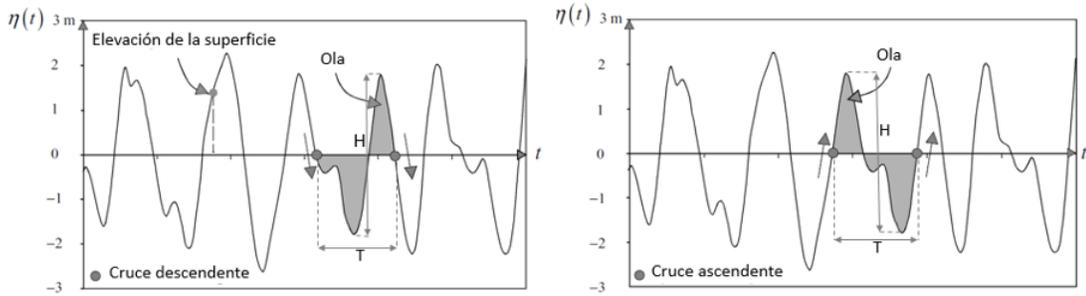


Figura 2.1: Definición ola.

Fuente: Adaptado de Holthuijsen. (2007).

Dada la definición anterior, la elevación de la superficie libre del mar puede ser negativa, pero no así una ola.

Para caracterizar una ola en un intervalo de tiempo, se usan promedios individuales de la altura de ola y el periodo. La duración del periodo de medición debe ser lo suficientemente corto de manera de asegurar régimen estacionario, pero lo suficientemente largo para obtener resultados estadísticamente confiables. Los periodos de medición típicamente adoptados tienen duraciones entre 15 y 30 minutos.

2.1.2. Altura de ola

La altura de ola se define como la distancia vertical entre el punto más alto y el más bajo de una ola (ver Fig. 2.1). Una ola tiene una, y solo una altura de ola. En un set de datos con N olas, la altura de ola promedio \bar{H} se define como:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (2.1)$$

donde i es la posición ordinal de la ola en el intervalo de tiempo (i.e., $i=1$ es la primera ola en el set de datos, $i=2$ es la segunda ola e $i=N$ corresponde a la última.).

Otra definición utilizada corresponde a *root-mean-square wave heighth*⁴ H_{rms} :

$$H_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

Las alturas de ola definidas por las ecuaciones 2.1 y 2.2 suenan bastante obvias, pero no son muy utilizadas, ya que es complejo hacer estas estimaciones de manera visual. Dado lo anterior, se define la altura significativa de ola, H_S , como el promedio del tercio superior de las alturas en un intervalo de tiempo (Sverdrup & Munk, 1946):

$$H_S = H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (2.3)$$

donde j no es el índice de la secuencia, si no el número de la ola en orden decreciente (i.e., $j=1$ es la ola de mayor altura, $j=2$ la segunda ola más grande, etc). Se ha demostrado experimentalmente que esta manera de medir la altura de ola es muy cercana a la altura de ola que un buen observador puede determinar visualmente, dado el sesgo que tiene un observador al fijar su atención en las olas de mayor altura.

2.1.3. Periodo

El periodo se define como el intervalo de tiempo entre el inicio y fin de la ola (ver Fig. 2.1). Como el periodo esta definido entre dos cruces por cero, se denota T_0 . El periodo promedio $\overline{T_0}$ se define de manera análoga a la altura de ola como:

$$\overline{T_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{0,i} \quad (2.4)$$

donde i es el índice en la secuencia de la ola en el intervalo de medición. Nuevamente, se define de forma análoga el periodo significativo como el periodo promedio del tercio de altura de ola superior T_S :

$$T_S = T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_{0,j} \quad (2.5)$$

donde el índice j sigue la misma definición que en el caso de la altura significativa de ola.

2.1.4. Espectro de oleaje

El objetivo de describir las olas mediante un espectro, no es describir en detalle una observación del movimiento de la superficie libre del mar; si no, describir el movimiento de la superficie libre como un proceso estocástico. Una observación es tratada como un proceso estocástico. El método básico para describir la elevación del nivel del mar $\eta(t)$ (ver Fig.2.1) es mediante el modelo de amplitud y fase aleatoria (the random-phase/amplitude model). En este modelo la elevación de la superficie es considerada la suma de un gran número de ondas armónicas, cada una con una amplitud constante y una fase aleatoria para cada realización del proceso estocástico (ver Fig. 2.2).

⁴Media cuadrática

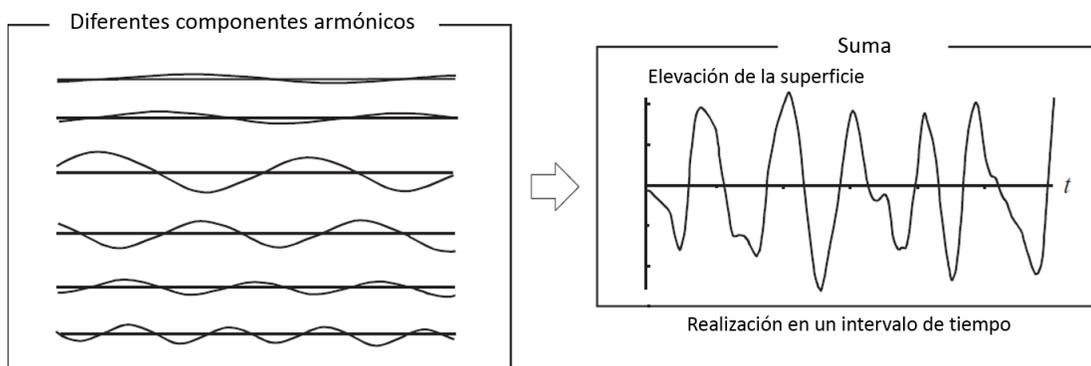


Figura 2.2: Random-phase/amplitude model.
Fuente: Adaptado de Holthuijsen (2007).

2.2. Oleaje de aguas profundas

El oleaje de aguas profundas es una abstracción donde se considera que las olas no son perturbadas por el fondo marino. Se asume que el océano tiene profundidad constante, que no existen obstáculos como islas, bajos, estructuras como rompeolas o puertos, y no hay efecto de corrientes.

Para poder describir el oleaje se debe tener en cuenta que éste está formado por un gran número de ondas armónicas independientes entre sí. Para entender la mecánica de una onda armónica se debe recurrir a la *Teoría Lineal de Oleaje* (desde ahora TLO). Esta teoría está basada sólo en dos ecuaciones fundamentales y en algunas condiciones de borde que describen ciertos aspectos dinámicos y cinemáticos de las olas (el detalle de la teoría se abordará más adelante).

El principal requerimiento para asegurar la validez de la TLO, es considerar olas cuya amplitud sea pequeña comparada con la profundidad y el largo de ola. Esta consideración recibe el nombre de *Aproximación de Pequeña Amplitud*. Esta teoría se conoce también como *Teoría de oleaje de Airy* (Wiegel and Johnson, 1951).

La TLO no es aplicable a olas que rompen o que están cerca de la condición de rotura. Para estas condiciones existen teorías no lineales de oleaje, las cuales serán mencionadas brevemente más adelante en este mismo capítulo.

2.2.1. Generación de oleaje

Hay múltiples mecanismos que generan movimiento en las masas de agua oceánicas: el efecto tirón gravitacional⁵ generado por la luna y el sol, diferencias en la presión atmosférica en la superficie libre del mar y el esfuerzo de corte que genera el viento sobre la superficie libre. La luna y el sol solo generan mareas periódicas con una circulación neta despreciable (Cushman-Roisin and Beckers, 2011). Por otro lado, la convección a altas latitudes genera corrientes que son responsables de un movimiento muy lento de las masas de agua. Esto deja al esfuerzo de corte generado por el viento a lo largo de la superficie libre del océano, como la principal fuerza generadora de movimiento en la porción superior del mar. El océano responde al esfuerzo de corte generado por el viento debido a la baja resistencia que opone el agua (baja viscosidad) y por la persistencia con la cual éste actúa (Cushman-Roisin and Beckers, 2011).

⁵Variación de velocidad que experimenta un planeta simplemente por el hecho de pasar por las cercanías de un cuerpo como el sol y la luna.

2.2.2. Teoría lineal de oleaje

Simplificaciones del movimiento y propiedades de la columna de agua

En el desarrollo de la TLO se debe considerar que el agua es un fluido ideal, y que las fuerzas generadas son producto únicamente de la fuerza gravitacional.

Se asume que el agua es incompresible y que tiene una densidad constante (i.e., contante en tiempo y espacio), y que no presenta viscosidad. El primero de estos supuestos es razonable, ya que las fuerzas involucradas son muy pequeñas. Con respecto a la idealización de densidad constante, las distancias horizontales en las cuales ésta varía en el océano (en aguas profundas y someras) son mucho mayores que la escala en la cual es aplicada la TLO. Localmente, la densidad y viscosidad pueden considerarse constantes en la dirección horizontal.

Los siguientes supuestos tienen que ver con el movimiento de las partículas de agua. Las partículas de agua no pueden abandonar la superficie libre, ni traspasar el fondo marino. Además se asume que la única fuerza que restaura la acción del viento, es la gravitacional.

Esta teoría ha sido ampliamente utilizada por más de 150 años.

Ecuaciones de balance

La base de la TLO son una ecuación de balance de masa y otra, de momentum (Holthuijsen, 2010). Considerando un elemento de fluido (ver Fig. 2.3) y que la propiedad transportada μ (propiedad arbitraria) a través del volumen es conservativa. La deducción de la ecuación de balance es de la siguiente manera:

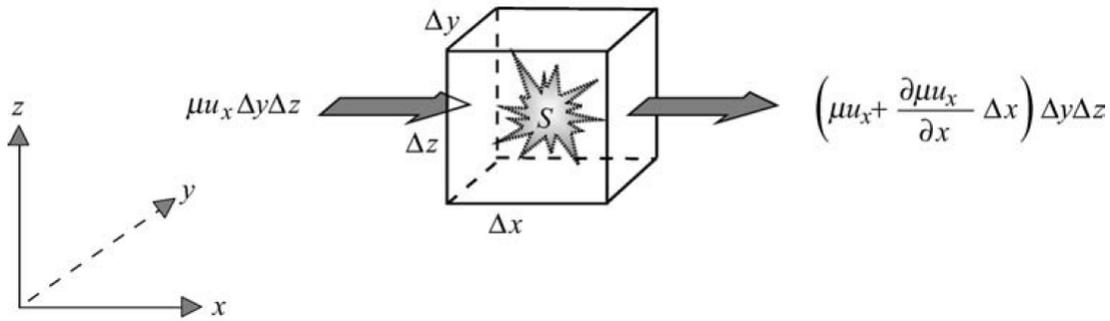


Figura 2.3: Propiedad μ transportada en dirección x a través de un volumen de control.
Fuente: Holthuijsen (2007).

almacenamiento de μ en intervalo Δt

= aporte neto de μ en intervalo Δt

+ producción local de μ en intervalo Δt

Desarrollando los términos de la expresión anterior, es fácil encontrar que la ecuación de balance para un parámetro μ arbitrario es:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \frac{\partial \mu u_x}{\partial x} + \frac{\partial \mu u_y}{\partial y} + \frac{\partial \mu u_z}{\partial z} = S \quad (2.6)$$

donde el primer término de la izquierda representa la tasa temporal de cambio de μ . Los otros tres términos del lado izquierdo corresponden a componentes advectivos, y por último, al lado derecho

se tiene un término fuente o sumidero. Considerando $\mu = \rho = cte$ (densidad del agua de mar), la ecuación 2.6 se reduce a la ecuación de balance de masa. Luego, considerando nulo el término fuente o sumidero, la ecuación de balance de masa se reduce a la ecuación de continuidad. Por otro lado si se reemplaza $\mu = \rho \vec{u}$ y $S = S_x$ (con S_x la producción de momentum en la dirección x) se obtiene la ecuación de balance de momentum.

Condiciones de borde

La TLO tiene cuatro condiciones de borde. La primera consiste en una condición cinemática de fondo que establece que el flujo es nulo a través del fondo, luego se tiene una cinemática de superficie que dice que las partículas de la superficie se mantienen en la superficie. Además, se tiene una condición dinámica en la superficie que corresponde a la ecuación de Bernoulli linealizada; y por último, se asume que las olas corresponden a ondas periódicas (Dean and Dalrymple, 1991).

$$\underbrace{\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \right|_{z=0}}_{(a) \text{ cinemática de fondo}} \quad \underbrace{\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \right|_{z=\eta}}_{(b) \text{ cinemática de superficie}} \quad \underbrace{\left. \eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{z=0}}_{(c) \text{ dinámica de superficie}} \quad \underbrace{\eta(0, z, t) = \eta(L, z, t)}_{(d) \text{ periodicidad}} \quad (2.7)$$

Función potencial de oleaje

La función potencial de oleaje es una herramienta útil para resolver de manera analítica las ecuaciones de balance y las condiciones de borde mencionadas recientemente. Esta función $\phi = \phi(x, y, z, t)$ está definida de tal forma que sus derivadas espaciales corresponden a la velocidad de las partículas de agua.

$$\nabla \phi = u \quad (2.8)$$

La función potencial de oleaje es solución de la ecuación de Laplace. Por otro lado, no es difícil demostrar que esta función satisface las 4 condiciones de borde de la TLO. La forma analítica de la función potencial de oleaje es (en 2D):

$$\phi(x, z, t) = \frac{Hc}{2} \frac{\cosh[\kappa(d+z)]}{\sinh(\kappa d)} \cos(\omega t - \kappa x) \quad (2.9)$$

Dónde:

c : celeridad de onda.

H : altura de ola.

d : profundidad.

$\omega = \frac{2\pi}{T}$, con T es el periodo.

$k = \frac{2\pi}{L}$, con L es el largo de ola.

2.2.3. Teorías no lineales de oleaje

Cuando las olas son muy grandes o la profundidad es muy baja, la TLO deja de ser válida. Cuando los efectos no lineales son demasiado importantes en escalas espaciales (unas pocas longitudes de ola), se debe considerar el uso de teorías no lineales. Una convención utilizada es considerar cada ola como un componente de un tren de olas (no armónicas), de forma, periodo y amplitud constantes.

El grado de no linealidad de las olas es cuantificado por el adimensional de Ursell:

$$N_{Ursell} = \frac{\overbrace{\left(\frac{H}{L}\right)}^{\text{esbeltez}}}{\underbrace{\left(\frac{d}{L}\right)^3}_{\text{profundidad relativa}}} \quad (2.10)$$

donde H es la altura de ola, L el largo de ola, y d la profundidad.

Teoría de Stokes

Esta teoría está formulada a partir de la función potencial de oleaje, y añade ondas armónicas extra a la ola de la teoría lineal. Vale la pena mencionar que esta teoría no funciona de buena manera en aguas poco profundas. La onda generada a partir de la teoría de Stokes es llamada ola de Stokes de segundo orden (Holthuijsen, 2010). En la actualidad es común que esta teoría se utilice hasta el quinto orden.

La velocidad de fase de la onda armónica extra es igual que la ola lineal, y su amplitud es constante, por lo que no varía a lo largo del espacio ni del tiempo. Es simétrica en la horizontal, pero no así en la vertical (ver Fig. 2.4).

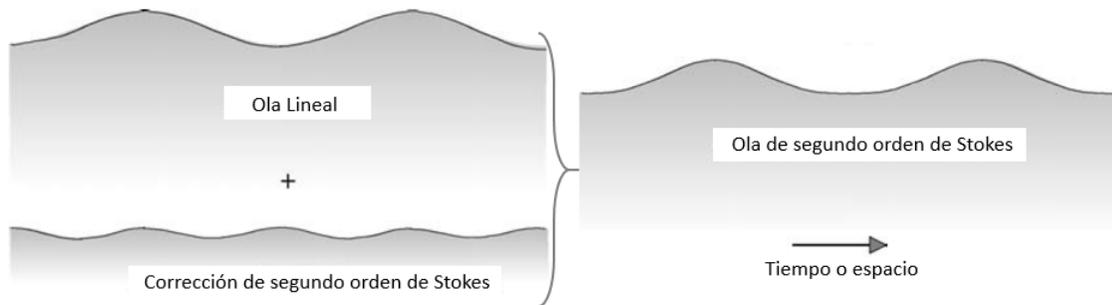


Figura 2.4: Perfil de ola de Stokes de segundo orden.

Fuente: Adaptado de Holthuijsen(2007).

Teoría de Dean

Esta teoría está basada en una función de flujo, y al igual que en la teoría de Stokes, se agregan ondas armónicas a la ola lineal. Otra diferencia con la teoría de Stokes, es que Dean determina todas las correcciones de manera instantánea y no separa el análisis para distintos ordenes (Dean and Dalrymple, 1991).

Con respecto al adimensional de Ursell, el rango de aplicabilidad de estas dos teorías es para $N_{Ursell} < 10$.

Teoría de Korteweg & de Vries

Para bajas profundidades las teorías antes mencionadas no aplican, por lo que debe recurrirse otras. La teoría kdv (o Cnoidal) es similar a las anteriores, salvo que usa ondas *cnoidales* (Cnoidal waves)(Miles, 1981), que son expresadas con funciones Jacobianas elípticas.

En la Figura 2.5 se pueden ver los rangos de aplicabilidad de las cuatro teorías mencionadas.

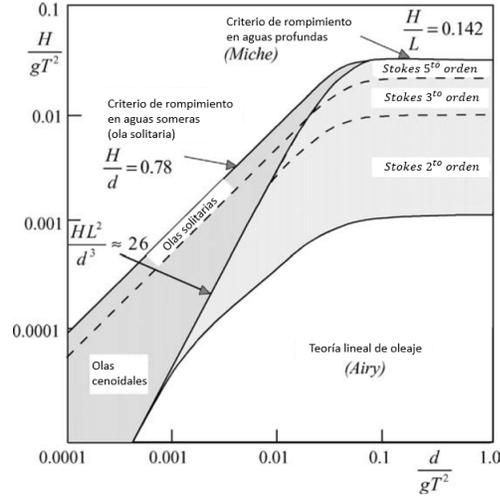


Figura 2.5: Rango de aplicabilidad de las teorías de oleaje.
Fuente: Adaptado de Holthuijsen (2007).

2.3. Modelos de generación y propagación de oleaje

El método tradicional para reunir datos históricos de olas ha consistido en realizar predicciones de olas basadas en información histórica de vientos, por un periodo no menor a 10 años. Este procedimiento conocido como *Hindcasting*, corresponde a una predicción estadística de largo plazo. A continuación se describen los modelos utilizados en este ámbito.

Dependiendo de cómo se resuelva numéricamente la ecuación de balance de energía, y la evolución teórica y experimental en la estimación de los términos que componen las fuentes o los sumideros de energía, los modelos espectrales se clasifican en primera, segunda o tercera generación.

Los modelos de primera generación no incluyen el efecto de las interacciones entre olas, sobrestiman la acción del viento y subestiman la fuerza de transferencia no lineal casi en un orden de magnitud (Group, 1988). Los modelos de segunda generación, a pesar de incorporar las interacciones no lineales mediante la parametrización y mediante la utilización de un espectro *JONSWAP*⁶, tienen limitaciones en la transferencia no lineal de energía y no se comportan bien en condiciones extremas de vientos rápidamente variables (Pintado et al., 2010).

En los modelos de tercera generación no se impone una forma definida del espectro y, tanto la ecuación de transporte de energía, como los términos no lineales se calculan completamente. Algunas de las ventajas que presentan estos modelos son que permiten observar la evolución en el espacio y en el tiempo del espectro de frecuencias y la altura de ola significativa, lo cual los hace más precisos. Además mejoran, con respecto a los predecesores de esta generación, la simulación en la transferencia de energía de mar de viento⁷ a mar de fondo⁸. El primer modelo, WAM (Wave Model) fue desarrollado y publicado por el grupo WAMDI (Wave Model Development and Implementation) en 1988, siendo actualmente uno de los más utilizados, ya que ha sido extensivamente testeado a escala global y mares confinados y acoplado a los modelos meteorológicos. Entre los modelos de

⁶Espectro de oleaje que describe olas de duración y alcance limitadas (olas limitadas por fetch).

⁷Oleaje de cresta corta y desordenado, que se desarrolla dentro de la zona de generación de oleaje

⁸Oleaje de cresta larga y ordenado, que se propaga fuera de la zona de generación

tercera generación más utilizados por la comunidad científica se encuentran el WAVEWATCH III y el TOMAWAC, para grandes escalas; y SWAN, STWAVE y MIKE21 SW, para escalas menores.

2.4. Medición de oleaje en aguas profundas

En ingeniería de costas es primordial tener información sobre el oleaje en aguas profundas, se busca cuantificar las observaciones del movimiento de la superficie libre para estudiar y eventualmente predecir las características de las olas. Por lo tanto, se necesita obtener una función del movimiento de la superficie libre en función del tiempo ($\eta(t)$). Esta información puede ser obtenida a partir de observaciones visuales realizadas por tripulaciones de barcos voluntarios de observación (voluntary observing fleet, VOF). La información visual presenta ciertos inconvenientes, por ejemplo, los barcos tratan de evitar tormentas por lo que estas condiciones no quedan bien representadas. Además, no todos los observadores están igual de cualificados y son igual de objetivos, por ejemplo las alturas de oleaje se aprecian de una mayor magnitud en la noche que en el día. Dado lo anterior, las condiciones de oleaje pueden ser sub o sobrestimadas (Holthuijsen, 2010).

Para evitar estos problemas, se prefieren las mediciones realizadas mediante instrumentos.

2.4.1. Técnicas in situ

Los instrumentos in situ pueden estar ubicados en la superficie libre del mar, o bajo ésta.

Boyas

Una manera de medir olas es seguir el movimiento 3D de las partículas de agua en la superficie libre. Esto se puede realizar con boyas que floten en la superficie, y midan la aceleración vertical mediante acelerómetros. Para obtener la elevación como función del tiempo, se debe integrar dos veces el registro de aceleración. Estas boyas están equipadas con radios que emiten señales a una estación donde es procesada la información. También se puede obtener información sobre la dirección de propagación del oleaje, para esto se necesitan inclinómetros que miden la pendiente de la superficie libre. Otro método usado para medir la dirección, es medir el movimiento horizontal propio de la boya.

Un inconveniente con las mediciones realizadas con boyas, es que tienden a subestimar olas pequeñas y a resonar en su frecuencia natural.

Wave poles

Esta tecnología consiste en sumergir un cable desde algún tipo de plataforma sobre la superficie del mar. La variación de la altura que alcanza la superficie en el cable puede ser registrada midiendo la resistencia eléctrica de la parte seca del cable. Para medir la dirección del oleaje se necesita un grupo de tres cables.

Otras técnicas de medición In situ

Echo sounder. El eco sonar invertido (inverted echo-sounder) es un instrumento que se instala a cierta profundidad bajo la superficie libre del mar, o por sobre ésta. Mide la posición de la superficie libre mediante un haz sónico.

Transductor de presión. Un transductor de presión ubicado a cierta profundidad puede medir las fluctuaciones de presión inducidas por el oleaje. Estas fluctuaciones, sumadas a la TLO pueden

ser usadas para estimar las características de las olas.

Medidores de corriente. Los medidores de corrientes son equipos que también se ubican bajo la superficie libre del mar; los cuales, midiendo los movimientos orbitales inducidos por las olas, pueden estimar sus características.

Wave-follower. Consiste en un paquete instrumental instalado en un *wave pole*, el cual se mueve hacia arriba y abajo con las olas registrando valores de sus parámetros.

2.4.2. Técnicas de medición remotas

Los instrumentos montados sobre la superficie libre del mar en plataformas móviles o fijas son llamados instrumentos de medición remota. El principio de estos instrumentos es recibir reflexiones de luz visible, infrarroja o energía. La mayor diferencia con las técnicas In situ, es que la medición remota abarca un área mayor en un periodo de tiempo corto, pero aumenta considerablemente el costo de operación.

Medición mediante imágenes

Fotografía estéreo. La fotografía estéreo es una herramienta que permite obtener imágenes tridimensionales de la superficie del mar. La diferencia entre fotos superpuestas puede ser convertida en información de la elevación de la zona fotografiada. Para aplicar esta tecnología al océano se deben usar dos cámaras sincronizadas (generalmente operadas en aviones) debido al movimiento de la superficie libre.

Radares en barcos. Los radares de barcos son usados normalmente para detectar objetivos peligrosos, pero también pueden ser usados para obtener información de las olas. Las olas detectadas por el radar están en rangos de centímetros, solo olas pequeñas reflejan las ondas del radar. Estas olas pequeñas son moduladas por olas grandes (las olas que interesan en el diseño de ingeniería). El radar es capaz de procesar esta modulación, y obtener información sobre olas de mayor tamaño.

Altimetría

Altimetría Láser. Un láser puede medir con buena precisión la distancia entre el instrumento y la superficie del mar (Holthuijsen, 2010). El instrumento que contiene el láser se debe ubicar sobre la superficie del mar en una plataforma fija, o móvil como un avión. Las mediciones con láser no se pueden realizar en satélites, ya que dependen mucho de las condiciones del clima. Esta técnica entrega imágenes tridimensionales de la superficie libre prácticamente “congeladas”, tal como en una imagen estéreo.

Altimetría acústica. Los sonares no son solo usados en técnicas de medición in situ, también son usados en mediciones remotas. Si se instalan sobre la superficie libre, son capaces de medir la distancia entre el instrumento y la superficie libre.

Radar altimétrico. Los radares también pueden ser usados para medir altitud, el instrumento es lo suficientemente preciso para medir la elevación instantánea del mar por debajo de él. Para distancias mayores, en particular desde satélites, el modo de operación de los radares altimétricos es diferente. En satélites, la “huella” del radar en la superficie del mar (zona iluminada) es de unos pocos kilómetros de diámetro (Fu and Cazenave, 2000) , la cual es demasiado grande para extraer información de olas individuales. Sin embargo, la señal reflejada por el mar es distorsionada por

la presencia de olas en la “huella”. Esta distorsión se utiliza para encontrar la “rugosidad” de la superficie del mar, mediante la cual se puede encontrar la altura significativa de ola e información útil para el cálculo del periodo. Los satélites altimétricos determinan la altura de la superficie oceánica respecto de un punto de referencia, el nivel medio mundial del mar, que se denomina “geoide terrestre”. Desde sus órbitas, los altímetros miden la topografía de la superficie del océano con gran exactitud para derivar las características del oleaje. La determinación de la distancia a la superficie terrestre se hace midiendo el tiempo que tarda un pulso de radar en viajar desde el satélite hasta la superficie y regresar (Acuña, 2011). Un buen procesamiento de los datos, con correcciones de las mediciones por efectos geofísicos, además de tener un conocimiento preciso sobre la órbita del satélite, permite medir la altura de ola bajo el recorrido del satélite con una precisión de dos a tres centímetros (Bosch, 2003). En la figura 2.6 se puede apreciar de manera esquemática cómo los satélites captan la rugosidad de la superficie del mar.

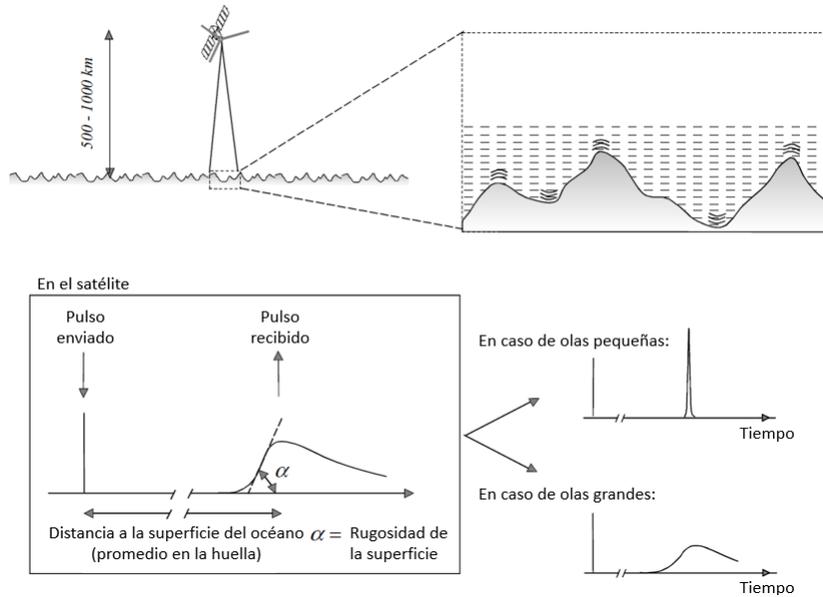


Figura 2.6: Radar altimétrico sobre un satélite.
Fuente: Adaptado de Holthuijsen (2007).

Las siguientes expresiones describen las observaciones básicas de la altimetría satelital (Acuña, 2011):

$$h = h_s + h_c + h_{iono} + h_{wet} + h_{dry} + h_{baro} + h_{otide} + h_{etide} + h_{ptide} + h_{EM} + b + \epsilon \quad (2.11)$$

$$CorSSH = h_{sat} - h \quad (2.12)$$

dónde:

h : distancia geométrica corregida entre el centro de masa del satélite y la superficie media del mar en el punto subsatélite (proyección de la posición del satélite sobre la superficie del océano en el momento de la medición, centro de la huella de medición).

h_s : distancia instantánea entre la antena del altímetro y la superficie oceánica.

h_c : corrección por desplazamiento de la antena del altímetro y la superficie oceánica.

h_{wet} : corrección por retardo troposférico en la parte húmeda de la tropósfera.

h_{dry} : corrección por retardo troposférico en la parte seca de la tropósfera.

h_{iono} : corrección por retardo ionosférico.

h_{baro} : corrección por efecto de barómetro inverso⁹.

h_{otide} : corrección por marea oceánica.

h_{etide} : corrección por marea de la tierra sólida.

h_{ptide} : corrección por marea del polo.

h_{EM} : corrección por estado del mar o sesgo electromagnético.

b : corrección por posible sesgo en la medición del altímetro de h (determinado por calibración in-situ).

ϵ : contribución de errores sistemáticos y aleatorios en la medición del altímetro de h .

h_{sat} : altura del satélite.

$CorSSH$: altura corregida de la superficie del mar.

A partir de la altimetría satelital, también es posible obtener información sobre el periodo de las olas (Caires et al., 2005). Este parámetro entrega información muy importante para el diseño de estructuras en contacto con el oleaje, y para el estudio de movimiento de barcos. En Gommenginger et al. (2003) se propuso un modelo empírico para obtener el periodo de las olas a partir de mediciones del satélite TOPEX:

$$T_m = -0,895 + 2,545 (\sigma_0 H_s^2)^{0,25} \quad (2.13)$$

dónde:

σ_0 : sección radar equivalente (Radar Cross-Section, en inglés).

H_s : altura significativa del estado de mar.

Vale la pena mencionar que este tipo de análisis sobre el periodo de las olas nunca ha sido realizado en el hemisferio sur.

2.5. Proyecto GlobWave

El proyecto GlobWave es una iniciativa de la Agencia Espacial Europea (ESA), subsidiado por el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) de Francia. Este proyecto forma parte del programa “Earth Observation Envelope Programme” (EOEP), el cual se encarga de observar la tierra a largo plazo, respondiendo a los requerimientos de la comunidad científica a través de nuevas tecnologías en materia de sensores remotos. A continuación se describe la información disponible.

Productos Near real-time (NRT)

Dependiendo del satélite, esta información está disponible en los servidores luego de una a cuatro horas de efectuada la medición. Cabe destacar que esta información no se utilizó en el desarrollo de esta investigación.

Productos Delayed mode (GDR)

Este tipo de datos se encuentran disponibles en el servidor ftp una vez que son producidos. No se tiene claridad sobre cuanto tarda en estar disponible la información luego de ser efectuada la medición. Los productos GDR corresponden a la base de datos satelitales usada para desarrollar el estudio.

⁹Descenso del nivel de las aguas del mar generado por causas atmosféricas

Herramientas de medición

En la tabla 2.1 se muestran las misiones disponibles en el servidor, y el lapso de tiempo en que midieron. Los satélites disponibles presentan diferencias, algunos cuentan con radares de apertura real y sintética; y otros, solamente de apertura real. La diferencia es que el primero mencionado, combina la información obtenida en varios barridos (mediante algoritmos) para recrear un “barrido virtual”, el cual podría ser obtenido si el satélite estuviera equipado con una antena de mayor tamaño.

Tabla 2.1: Satelites disponibles en servidores de GlobWave.

Satélite	Periodo con información
Altika	2013
Cryosat2	2010 - 2012
Envisat	2002 - 2012
Ers1	1991 - 1996
Ers2	1995 - 2009
Geosat	1985 - 1989
Geosat Follow-on (GFO)	2000 - 2008
Jason1	2002 - 2013
Jason2	2008 - 2015
TOPEX/Poseidon	1992 - 2005

Fuente: <ftp://eftp.ifremer.fr/waveuser/globwave/data/>

2.6. Calibración de oleaje estándar en la industria

La calibración de datos de oleaje de aguas profundas es realizada por diferentes empresas, las cuales venden series de 20 años o más de oleaje calibrado.

Los datos obtenidos por modelos de generación de oleaje son calibrados principalmente con datos de altimetría satelital y observaciones de boyas. Luego, esta calibración se aplica al total de datos modelados obteniéndose una serie histórica de oleaje calibrada. Las fuentes de datos utilizadas corresponden a oleaje generado a partir de modelos de *hindcasting* más la información de misiones satelitales principalmente europeas y norteamericanas. Los datos modelados son distribuidos por centros científicos como *The European Centre For Medium Range Weather Forecast (ECMWF)*, el cual proporciona de manera gratuita la información según condiciones de nacionalidad y afiliación.

La calibración consiste en asociar datos modelados a datos medidos mediante altimetría para un cierto punto en aguas profundas.

Las bases de datos de oleaje modelado presentan información de estados de mar cada una, tres o seis horas generalmente. Además de necesitar datos altimétricos en las cercanías del punto modelado, se necesita que los datos satelitales sean medidos en el mismo instante de tiempo en que el dato fue producido por el modelo. Debido a que la probabilidad de cumplir las dos condiciones anteriores es baja (a pesar de que un satélite emite al rededor de 1.700 pulsos por segundo), es necesario definir ventanas temporales y espaciales en las cuales se pueda considerar que los pares de datos (modelados y medidos) son lo suficientemente cercanos en tiempo y espacio para ser considerados en la calibración.

Actualmente se utilizan regresiones lineales con muestras de 1.000 pares de datos (puede ser incluso mucho menor) para calibrar 20 años de oleaje modelado, lo cual proporciona incertidumbre respecto de la validez de la calibración.

La calibración estándar en la industria no permite diferenciar el análisis para oleaje proveniente de diferentes direcciones, ni para datos de operación (oleaje promedio) o tormenta (oleaje extremo); tampoco se explica el proceso con el que se generan los pares de datos.

Lo anterior entrega mayor valor al presente trabajo, ya que es parte de los objetivos proponer una nueva metodología de calibración donde el análisis sea más preciso y se le permita al usuario definir las ventanas temporales y espaciales a usar.

Dos firmas que se destacan en esta área son Fugro Oceanor, y Baird con el proyecto Olas Chile. el informe de validación técnica del proyecto Olas Chile es de libre acceso, por lo que se describirá a continuación.

Proyecto Olas Chile

Este proyecto nace en el año 2002 como una base de datos de oleaje espectral en aguas profundas para la costa chilena con 40 años de extensión. En la actualidad, el proyecto se encuentra en su versión V y proporciona una base de datos de espectros bidimensionales de oleaje cada 3 horas con una extensión de 34 años (Baird, 2015).

Olas Chile es la base de datos institucional del Ministerio de Obras Públicas para la revisión de proyectos de ingeniería de costas.

La validación de la base de datos de Olas Chile V se efectuó contra seis estaciones de medición del satélite Topex, y también con boyas del SHOA (Baird, 2015).

Las principales diferencias entre el proyecto Olas Chile y el presente trabajo, es que en este último se usará la totalidad de la base de datos de información satelital proporcionada por el proyecto GlobWave, y no sólo el satélite Topex. Además, el objetivo de este trabajo no es generar una base de datos de oleaje espectral de aguas profundas para toda la costa chilena, si no que desarrollar un método de calibración local de oleaje offshore en un punto de interés cualquiera.

2.7. Oleaje de aguas someras

A falta de mediciones y estadística de larga data, el oleaje en aguas someras puede ser obtenido mediante la utilización de modelos numéricos para la propagación de éste desde aguas profundas. Algunos *softwares* utilizados se mencionan en el numeral 2.3. Los principales procesos físicos que participan en la propagación de oleaje se indican a continuación:

Asomeramiento (Shoaling)

Proceso mediante el cual las olas reaccionan al cambio de profundidad del fondo marino modificando su altura. Las olas al entrar en aguas pocas profundas disminuyen su velocidad, disminuyendo su longitud de onda. Para satisfacer el balance de energía (sin fuentes ni sumideros), las olas deben aumentar su altura generando un aumento en su densidad energética (*energy bunching*¹⁰). Debido a este proceso es que uno puede apreciar que las olas se peraltan aumentando su altura al acercarse

¹⁰Empaquetamiento de energía.

a la línea de costa.

Refracción

La cresta de las olas se mueven más rápido en aguas profundas que en aguas someras. Si una ola no se propaga perpendicularmente a los veriles¹¹ o isobatas del fondo marino, ésta cambiará su dirección hasta orientarse de manera perpendicular a la línea de costa. En un intervalo de tiempo dado, la cresta de la porción de la ola que se encuentra en aguas más profundas, se moverá más rápido que la porción que está en aguas menos profundas. Lo anterior se traduce en que la ola gira hacia la región de aguas someras, es decir, hacia la costa. Esta es una característica universal de las olas: una ola siempre gira hacia la región donde la velocidad de propagación es menor.

Difracción

Tranferencia lateral de energía que lleva consigo un cambio de dirección de propagación y altura de los trenes de olas debido a la presencia de un obstáculo en la superficie (isla, rompeolas, saliente rocosa, etc.). El cambio en la dirección y la altura se da debido a que las olas tienden a rodear el obstáculo.

Reflexión

Lo más probable es que cualquier costa refleje olas en cierto grado. Una pared vertical puede reflejar el 100 % de la energía incidente, por otro lado, una playa de pendiente suave reflejará un porcentaje menor.

En zonas con reflexión, la altura total del oleaje corresponde a la suma entre la ola incidente y la reflejada. Este fenómeno puede cobrar importancia en dársenas¹² donde las olas se reflejan en las paredes. Al ocurrir esto, las olas aumentan su amplitud al doble y se genera una ola estacionaria que puede afectar el *downtime* operacional de puertos¹³.

El concepto de aguas someras se refiere a la zona donde el oleaje sí es afectado por la profundidad del fondo marino. En esta zona se intensifican los fenómenos no lineales; aumentando la complejidad del análisis matemático. Por ejemplo, los procesos de generación e interacción entre olas tienden a intensificarse en aguas someras, además la ola tiende a disminuir su velocidad. Lo último genera que la razón entre la velocidad del viento y la velocidad de la fase aumente, traduciéndose en un aumento de la energía transferida desde el viento hacia las olas (Holthuijsen, 2010). Los procesos adicionales presentes en aguas someras están relacionados con la interacción entre olas y disipación de energía (Eldeberky and Battjes, 1994).

Los datos de oleaje de aguas someras son los inputs de la mayoría de proyectos de ingeniería marítima, por lo tanto es imprescindible que estos sean lo más precisos posible. Como se mencionó anteriormente, éstos datos son producto de propagaciones de oleaje desde aguas profundas. Por lo tanto, para tener datos de aguas someras confiables, es primordial tener información de aguas profundas lo más precisa posible; lo cual representa uno de los objetivos del presente trabajo.

¹¹Curvas de nivel del fondo marino

¹²Parte resguardada o protegida de los puertos, para la carga o descarga de embarcaciones

¹³Porcentaje de tiempo en que las condiciones de oleaje no permiten que los barcos atracados puedan operar

3. Fuentes de información

3.1. Información satelital

La información satelital a utilizar en el presente trabajo se encuentra disponible de forma gratuita en el servidor ftp del proyecto GlobWave ¹⁴.

Los datos se encuentran organizados según la herramienta de medición, SAR (radar de apertura sintética) o RAR (radar de apertura real); siguiendo con una diferenciación sobre el tipo de producto, NRT o GDR. Luego, la información se clasifica según la misión, seguido del año, y posteriormente el día juliano de la medición. Finalmente, dentro de cada día se tiene una serie de archivos donde se especifica toda la información anterior en el nombre, sumado al número del recorrido de la misión (de ahora en adelante, *track*).

Los archivos presentan extensión “.nc” derivado de netCDF, el cual es un formato de almacenamiento de información binaria. El formato netCDF usado, es auto-descriptivo, ya que incluye información acerca de las variables contenidas en el archivo, es independiente de la plataforma en la que se esté trabajando, y su manejo y edición es altamente eficiente. El formato no es único, existe un modelo básico, y uno complejo. El modelo clásico o básico consta de un encabezado con la información de las variables almacenadas, tal como dimensiones, atributos, y nombre. El modelo mejorado (netCDF4) permite estructuras de almacenamiento más complejas. Es posible ordenar la información de forma jerárquica mediante grupos, tal como las carpetas en un sistema de ficheros.

Cada archivo, dependiendo de la herramienta de medición, entrega un conjunto de variables en particular. Como se mencionó en el capítulo anterior, se tiene diferentes herramientas de medición disponibles y éstas no reportan las mismas variables. La mayor diferencia se da en que los archivos que presentan mediciones efectuadas por radares SAR, tienen información sobre el espectro de cada medición. A continuación en la Tabla 3.1 se muestra un listado con las principales variables a utilizar en el análisis, su unidad y la herramienta con que es medida.

Tabla 3.1: Variables satelitales usadas en el análisis.

Variable	Unidad	Herramienta de medición
Tiempo	s (desde 01-01-1985)	SAR y RAR
Latitud	° sexagesimal	SAR y RAR
Longitud	° sexagesimal	SAR y RAR
Hs	m	SAR y RAR
Hs calibrada	m	SAR y RAR
Calidad Hs	3 niveles	RAR
σ_0	dB	SAR y RAR
σ_0 calibrado	dB	SAR y RAR
Calidad σ_0	3 niveles	SAR y RAR
u_{viento}	m/s	SAR y RAR
v_{viento}	m/s ²	SAR y RAR
polSpec	m ²	SAR

Fuente: Ash, Busswell, & Pinnock (2012).

Vale la pena destacar que las misiones satelitales no reportan directamente información sobre el periodo o la dirección de propagación del oleaje.

¹⁴<ftp://eftp.ifremer.fr/waveuser/globwave/data/>

Como se mencionó, para realizar la calibración es necesario definir un criterio espacio-temporal con el cual se puedan generar pares de datos medidos y modelados. Según la manera en que se clasifica la información en el servidor del proyecto GlobWave, a priori sólo se conoce el día en que se realizó la medición; no la hora, ni las coordenadas del recorrido. Debido a que con la información entregada en el nombre de cada archivo, es imposible determinar si este es útil o no para realizar la calibración, se deberá analizar la totalidad de la información disponible en el servidor. La metodología de procesamiento de los archivos satelitales se explicará más adelante.

3.2. Información oleaje modelado NCEP

La base de datos *NCEP Climate Forecast Reanalysis Reforecast*, de ahora en adelante NCEP Reanálisis, fue generada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA¹⁵). Corresponde a una serie temporal de parámetros de oleaje generada a partir del modelo WAVEWATCH III. Este modelo permite obtener información de oleaje de aguas profundas a escala global. La información NCEP Reanálisis debe su nombre a que la entrada del modelo es información de viento obtenida a partir del reanálisis de datos atmosféricos, oceánicos, de cobertura de hielos, y tierra. La serie presenta información desde 1979 a 2009 (31 años) con estados de mar cada una hora. Los datos se encuentran distribuidos en una grilla de 1° de resolución espacial, a nivel global.

En el presente trabajo solo se analizan cinco bahías chilenas, las cuales fueron seleccionadas debido al alto número de proyectos desarrollados por parte de PRDW. Lo anterior es de gran importancia, ya que parte del trabajo consiste en implementar los climas de oleaje generados en proyectos de ingeniería de costas ya desarrollados. Sin embargo, las metodologías propuestas fueron elaboradas para utilizarse en cualquier parte del mundo.

A continuación, en la Tabla 3.2 se muestran las coordenadas de los nodos en los cuales se extraerá la información.

Tabla 3.2: Ubicación nodos de aguas profundas.

Nodo	Coordenadas [lon, lat]
Arica	(-72, -19)
Iquique	(-72, -20)
Mejillones	(-72, -23)
Valparaíso	(-73, -33)
Coronel	(-75, -37)

La información extraída es extraída separadamente para cada nodo, y se organiza temporalmente. Vale la pena destacar que ésta se encuentra en archivos de texto.

Cada archivo presenta la información de un mes, con aproximadamente 1730 líneas de datos, cada una correspondiente a un estado de mar. Los parámetros entregados son la fecha del dato, la velocidad y dirección del viento, altura significativa (H_s), periodo pico (T_p), dirección pico (D_p), índice de dispersión direccional (sp), y el número de frentes que componen el estado de mar. Si este último parámetro es mayor que uno, se presentan los parámetros H_s , T_p , D_p y sp de cada frente. Por lo tanto, el número de columnas de cada línea, va a depender del número de frentes que tenga el estado.

¹⁵<http://www.noaa.gov/>

3.3. Preprocesamiento de la información

Como se hizo notar en los numerales 3.1 y 3.2, es necesario procesar de alguna forma la información satelital y modelada para obtener series de tiempo de altura, dirección y periodo sobre el nodo donde se quiere realizar la calibración.

Las variables medidas con altimetría satelital se dividen en tres categorías, dependiendo de la dimensión de la variable. Existen variables de una, dos y tres dimensiones; las cuales serán explicadas más adelante. En el presente trabajo se utilizaron variables 1D y 3D.

En esta sección se describirá el proceso que se debió realizar para poder disponer de los datos en un formato inteligente para desarrollar las metodologías de calibración. Se describirá en detalle el proceso realizado con las variables satelitales 1D, 3D, y con los resultados de los modelos globales. El total de las misiones cuentan con radares de apertura real (capaces de medir variables 1D), y solo tres con radares de apertura sintética (variables 1D y 3D). De éstas tres, solo está disponible la información del satélite Envisat.

3.3.1. Variables satelitales 1D

De las variables satelitales mostradas en la Tabla 3.1, todas excepto una, son series de tiempo 1D. Como se mencionó, no es posible identificar a priori que archivo presenta información de utilidad sobre algún punto de interés; dado lo anterior es necesario comprobar en la totalidad de la información (70 GB), cuales son los archivos que contienen información útil.

El primer paso para rescatar la información satelital útil, es definir un dominio espacial en el cual se aceptará que las mediciones y los datos modelados son lo suficientemente cercanos espacialmente para ser usados en la metodología de calibración. En un estudio preliminar realizado por PRDW, se recomienda considerar las mediciones satelitales efectuadas en un círculo de 100 km de radio alrededor del nodo modelado.

Las ventanas espaciales usadas en este estudio son círculos de radio $0,5^\circ$; $0,75^\circ$; y $1,0^\circ$ ($1^\circ \approx 111$ km). Como los nodos elegidos están a distancias mayores o igual a 1° entre si, se generó una base de datos para cada uno, y para cada radio de ventana espacial adoptado. En total, se generaron 15 bases de datos de información satelital 1D.

Para generar cada base de datos, fue necesario desarrollar una rutina de programación que analizara uno a uno los archivos satelitales (cerca de 750.000), y rescatara las variables mencionadas en la Tabla 3.1 (excepto `polSpec`, ya que es una variable 3D) que estuvieran dentro de la ventana espacial en un “Pandas DataFrame”¹⁶. Además, en cada registro de la base de datos se indica el nombre de la misión que realizó la medición, y el nombre del archivo del que proviene. Un Pandas DataFrame (de ahora en adelante DF) es una especie de matriz a la que se le puede asignar un índice, y un encabezado con el nombre de la variable que se almacenará en cada columna. La fecha y hora de la medición (con precisión de milésimas de segundos) se dispuso en el índice del DF, y el nombre de cada variable almacenada, como el encabezado de cada columna.

Densidad de la información

Si bien se mencionó que la información satelital presenta una amplia extensión temporal (1985 hasta la fecha), el número de misiones en órbita no ha sido constante a lo largo de los años (ver Tabla 2.1).

¹⁶<http://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/generated/pandas.DataFrame.html>

En la Figura 3.1 se puede ver el número de pasadas satelitales por mes, en una ventana espacial de 1° frente a las costas de Coronel.

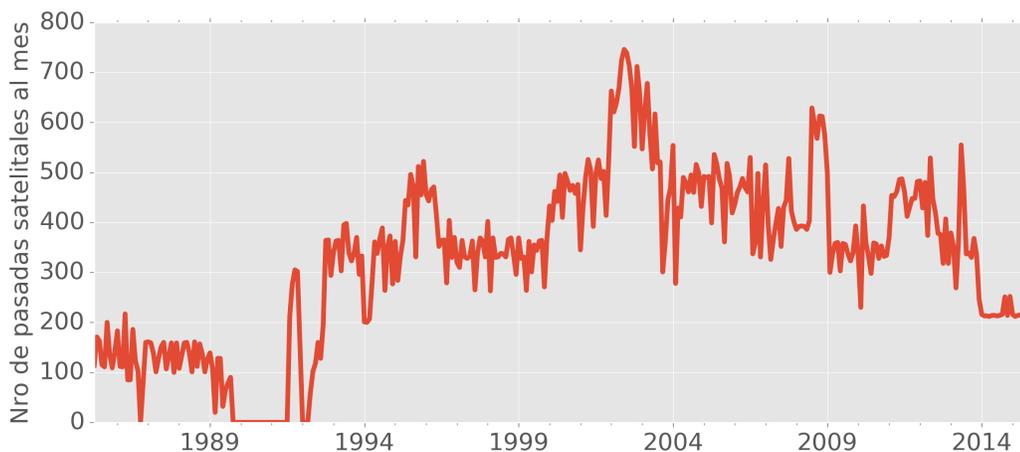


Figura 3.1: Número de pasadas satelitales en una ventana espacial de 1° , Coronel.

En la figura anterior se puede ver que cerca del año 1991 no se tienen datos en la ventana espacial elegida, lo que concuerda con la información entregada en la Tabla 2.1. Entre los años 1989 y 1991 no se efectuaron mediciones de altimetría satelital.

Calidad de la información

Cada medición satelital tiene asociado un parámetro que expresa su calidad, este parámetro se mide en tres niveles (ver Tabla 3.3). La calidad de la información determinará en cierta parte el tamaño de la muestra que se usará para generar los ajustes lineales. En la tabla siguiente se muestran los niveles del parámetro de calidad.

Tabla 3.3: Calidad mediciones satelitales.

Valor	Significado
0	Medición probablemente buena
1	Medición generalmente aceptable
2	Medición probablemente mala

Con respecto al tamaño de la muestra satelital, surgen las siguientes interrogantes: ¿Qué extensión debe tener la base de datos medidos para calibrar 31 años de datos modelados cada una hora?, ¿Cuál es la calidad de las mediciones que se deben considerar para generar las calibraciones?

En el presente informe no se busca dar respuesta a estas preguntas, la decisión dependerá del usuario de la metodología. La calidad de datos elegida para obtener los resultados que se presentan en el informe se fundamenta más adelante. En la Figura 3.2 se aprecia como varía el tamaño de la muestra de datos satelitales en función la calidad.

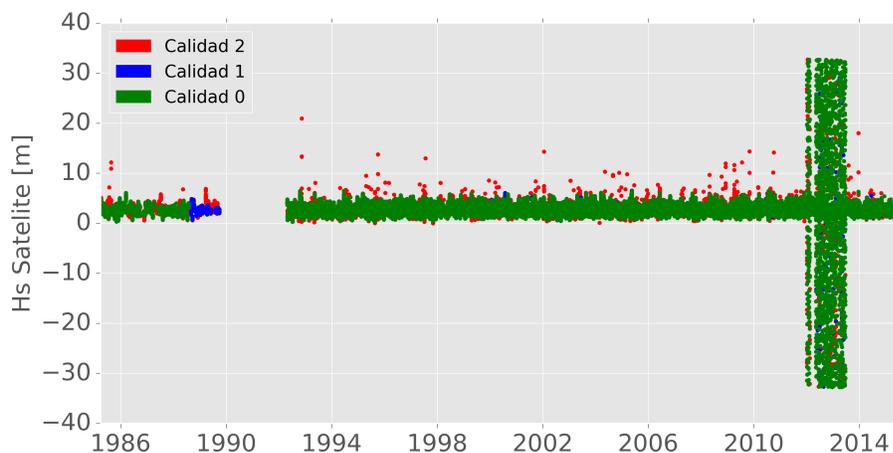


Figura 3.2: Serie de tiempo de la H_s medida frente a Valparaíso en una ventana espacial de 1° .

En la figura anterior se puede apreciar que entre los años 2010 y 2014 hay datos inconsistentes, ya que es físicamente imposible que se tengan alturas de ola negativas, y es muy poco probable, que hayan olas de más de 30 metros. Debido a que son datos con calidad 0 los que presentan este comportamiento, se debió determinar cuál satélite es el que está entregando información errónea.

Filtrando las alturas mayores que 20 m, se encontró que estas fueron reportadas por el satélite Jason-1 en fechas posteriores al año 2012. Se decidió eliminar todas las mediciones efectuadas por este satélite luego de la fecha mencionada. La decisión de no desechar el total de datos de la misión Jason-1, se debe a que el número de mediciones supuestamente correctas es de al rededor de 10.000 datos en cada ventana. En la Figura 3.3 se muestra la distribución temporal de la altura de ola medida frente a las costas de la V región eliminando los datos dudosos (cerca de 2.000 mediciones).

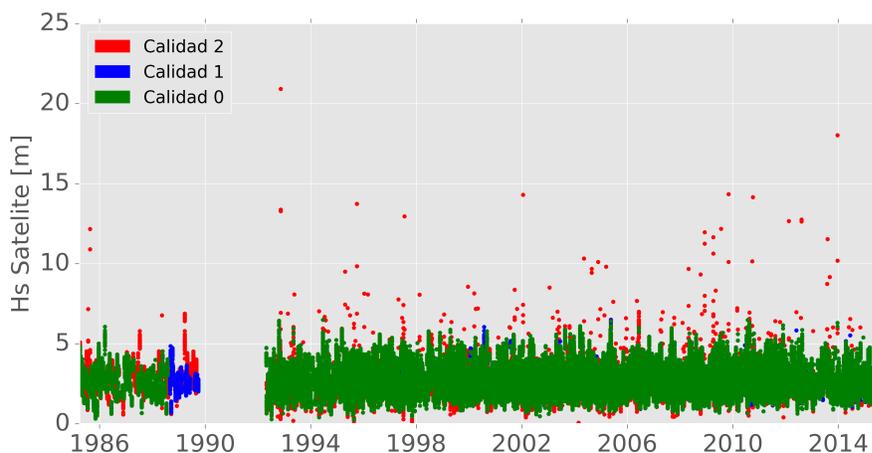


Figura 3.3: Serie de tiempo de la H_s medida frente a Valparaíso en una ventana espacial de 1° sin valores atípicos (outliers).

3.3.2. Variables satelitales 3D

La variable “polSpec”, reportada por el satélite Envisat (con radar de apertura sintética), es la única variable 3D con la cual se trabajará. Ésta entrega información sobre el espectro de oleaje medido, por lo que es útil para obtener (de forma indirecta) información sobre el periodo y la dirección de propagación de las olas. Esta variable entrega la distribución de la energía espectral del oleaje en el

dominio de la dirección y la frecuencia. La dirección se discretiza en 36 intervalos de 10° , partiendo desde 0. Por otro lado, el espectro se presenta en función del número de ola, y no de la frecuencia, en 24 intervalos.

El hecho de que la variable “polSpec” se encuentre disponible solo para una misión, se tradujo en que no se debió recorrer el total de la información satelital, sino que solo los archivos SAR del satélite Envisat. Se debió desarrollar una rutina de programación que analizara los archivos antes mencionados, y que rescatara la información medida sobre el dominio espacial especificado.

En cada medición se registra un espectro, por lo que para cada tiempo se tendrá una matriz de datos. Dado lo anterior, una manera eficiente de almacenar la información útil fue concatenar las matrices medidas para cada tiempo. La herramienta utilizada para rescatar la información espectral corresponde a un “Pandas Panel”¹⁷ (de ahora en adelante panel), el cual corresponde a un tensor que se forma concatenando DF’s en profundidad. En la Figura 3.4 se busca aclarar esta definición.

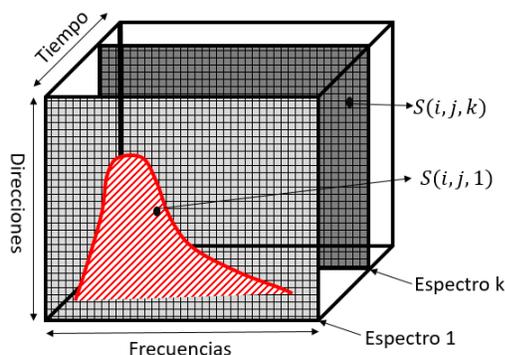


Figura 3.4: Pandas Panel utilizado en variable polSpec.

Como se mencionó anteriormente esta variable es de suma importancia, ya que permite encontrar para cada espectro medido los valores de los periodos pico y medio, y las direcciones pico y dirección media. Los parámetros pico corresponden a la dirección y frecuencia de la celda de mayor energía. Los parámetros medios se calculan como promedios vectoriales con las formulas mostradas a continuación:

$$T_{m01} = \frac{\int S(f, \theta) d\theta df}{\int S(f, \theta) f d\theta df} \left[\frac{1}{s} \right] \quad (3.1)$$

$$D_m = \frac{\int S(f, \theta) \sin(\theta) d\theta df}{\int S(f, \theta) \cos(\theta) d\theta df} [rad] \quad (3.2)$$

Además, se desarrolló una rutina que permitiera visualizar cada espectro en coordenadas polares, y para cada uno de estos, calculara ambos periodos y direcciones. En la Tabla 3.4 se muestran los valores para ambos periodos y direcciones extraídos de los espectros mostrados en la figura 3.5.

¹⁷<http://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/generated/pandas.Panel.html>

Tabla 3.4: T_{m01} , T_P , D_m , y D_P para espectros medidos frente a Mejillones.

	Figura 3.5 (a)	Figura 3.5 (b)
T_{m01} [s]	11,86	12,35
T_P [s]	11,09	11,91
D_m [°]	237,7	254,3
D_P [°]	230	230
H_s [m]	1,01	0,704

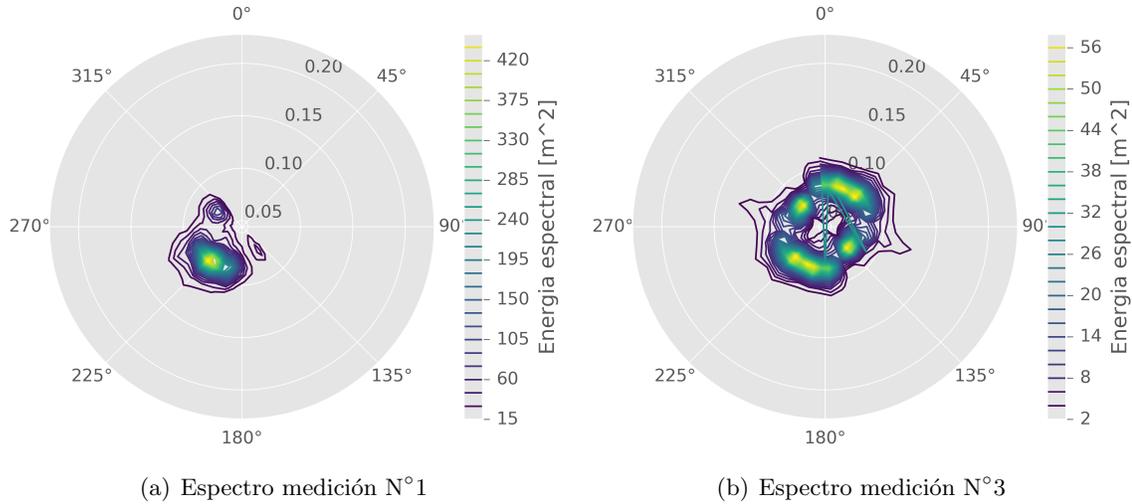


Figura 3.5: Espectros medidos en una ventana de 1° frente a Mejillones.

En la Figura 3.5 (a) corresponde a un espectro de oleaje típico de los observados en las costas de Chile, además los parámetros calculados en la Tabla 3.4 presentan valores usuales. Si bien los valores encontrados a partir del espectro mostrado la Figura 3.5 (b) están dentro de los rangos típicos para olas en las costas de nuestro país (oleaje del tercer cuadrante, y periodos cercanos a los 12 s), del gráfico se puede concluir que el espectro está mal medido o los datos son inconsistentes. Lo anterior se debe a que es imposible que la energía se concentre en el primer cuadrante, ya que significaría que la ola se está propagando desde la costa hacia aguas profundas.

El problema mostrado con la Figura 3.5 (b) es relevante, ya que a pesar de que el gráfico del espectro 3.5 (b) indica alguna clase de error, los parámetros calculados están dentro del rango normal. Por lo tanto se deberá analizar gráficamente uno a uno los espectros que presenten inconsistencias, ya que los espectros de la Figura 3.5 corresponden a mediciones con calidad 0. Por otro lado, al haber una sola misión que reporte esta variable, el número de mediciones es muy bajo comparado con el total de datos modelados.

En Mejillones la serie espectral tiene una extensión de 291 valores, con los cuales se quiere calibrar una serie de 31 años con datos cada una hora (271.560 estados de mar aproximadamente).

Debido a las razones anteriores, se puede concluir a priori que la calibración del periodo y dirección modelados con este tipo de información tiene una baja probabilidad de resultar satisfactoria, pero más aún, su baja cantidad de datos proporcionará escaso valor adicional al análisis.

3.3.3. Oleaje modelado

Como se mencionó en el numeral 3.2, la base de datos NCEP Reanalysis se encuentra en formato de texto. Se debió generar una rutina de programación que recorriera uno a uno el total de archivos, y que generara una serie de tiempo para los siguientes parámetros: H_s , T_p , D_p , n , ΔD . Se definió el parámetro ΔD , el cual indica la máxima diferencia entre la dirección de propagación de las olas que componen un estado de mar. Si el estado de mar es unimodal, el parámetro ΔD , presenta un valor nulo. Nuevamente, la información se almacenó en un DF.

En el caso de tener un estado de mar compuesto por más de un frente, se consideran los parámetros estadísticos de resumen del oleaje *overall*¹⁸. Estos parámetros son estimados por el modelo, por lo que no se puede llegar exactamente desde los parámetros de cada frente al valor overall; salvo por la altura que corresponde a la raíz de la suma de cada componente al cuadrado.

A modo de ejemplo se muestra la distribución temporal de la altura significativa, periodo pico y dirección pico frente a la bahía de Iquique en la Figura 3.6.

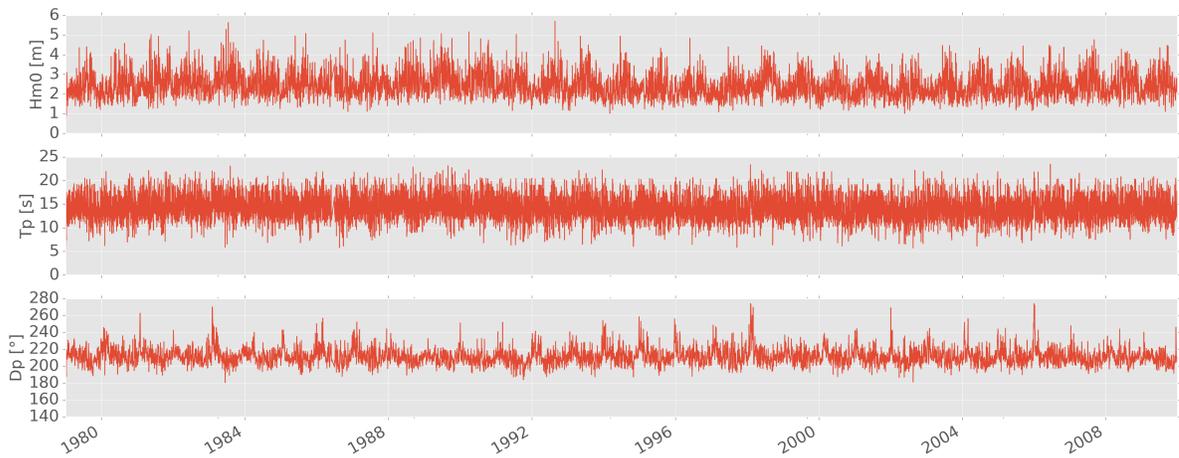


Figura 3.6: Series de tiempo modeladas en Iquique.

¹⁸Parámetros resumen para estados de mar compuestos por uno o más frentes

4. Metodologías de calibración

En el presente trabajo se presentan tres metodologías de calibración de oleaje de aguas profundas mediante información satelital. Dos de éstas corresponden a variaciones de la calibración estándar de la industria. La tercera metodología es una sensibilización de una de las anteriores donde se diferencia el análisis para olas de tormenta y operación, para oleaje proveniente de diferentes direcciones, y para oleaje *swell* o *sea*.

En este capítulo se presentan los procesos de filtrado que fue necesario aplicar a las bases de datos para generar las calibraciones, luego se describen las metodologías desarrolladas, y se muestran los resultados obtenidos con cada una.

4.1. Filtros

4.1.1. Filtro espacial N°1

Como se mencionó, las mediciones satelitales abarcan casi la totalidad del planeta, por lo que se deben seleccionar las mediciones efectuadas dentro de las ventanas espaciales frente a las cinco zonas que se estudiarán. En la siguiente figura se muestra el recorrido y cobertura espacial que tienen 2 misiones satelitales en un año.

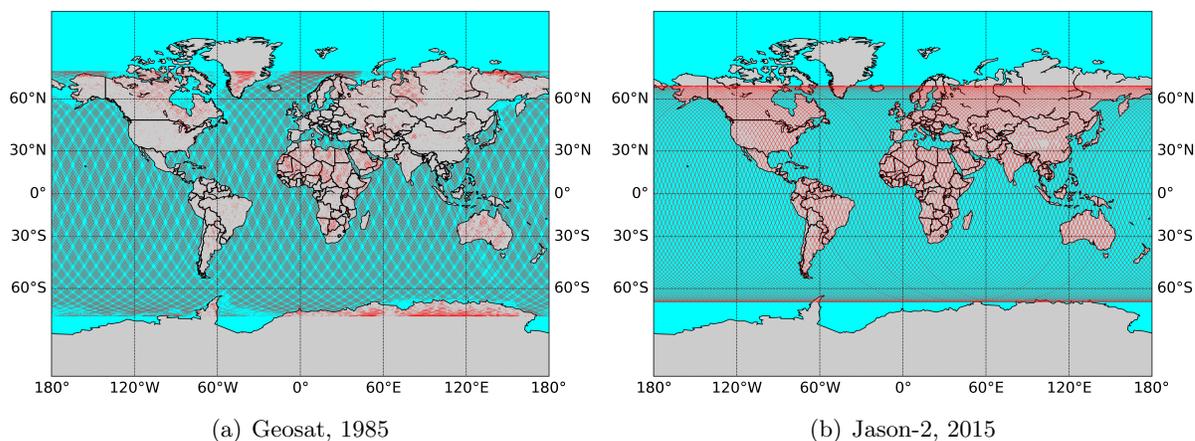


Figura 4.1: Cobertura espacial Geosat en 1985, y Jason-2 en 2015.

En general, los satélites repiten su recorrido mientras se encuentran en órbita. Por lo que cada cierto número de días vuelven a pasar sobre el mismo lugar.

Uno de los puntos importantes para realizar una calibración confiable y representativa, es definir una ventana espacial que permita obtener mediciones satelitales homologables a los datos modelados. Por lo tanto, la ventana espacial debe ser lo suficientemente grande para obtener una amplia muestra de mediciones, y lo suficientemente pequeña, para aceptar que éstas y los datos modelados tengan la misma ubicación geográfica. El objetivo de este trabajo no es definir el valor óptimo de la ventana espacial, sino desarrollar una serie de metodologías de calibración donde el radio del dominio espacial sea modificable por el usuario.

Para determinar los valores del radio de la ventana espacial a usar, se analizó la variación porcentual de la altura significativa modelada (H_s) para dos series de oleaje ubicadas a 1° de distancia graficando la variación de ésta en función del porcentaje acumulado de información. Se obtuvo que considerando un 90% de la información, la diferencia de altura significativa es menor al 10%; la

Figura A.1 se adjunta en el Anexo A. Debido a lo anterior no se recomienda usar ventanas espaciales de radio mayor a 1° , por lo que en el presente trabajo se utilizaron ventanas de $0,5^\circ$; $0,75^\circ$ y $1,0^\circ$.

En la Figura 4.2 se muestran las ventanas espaciales utilizadas para calibrar el nodo de Arica. Además, en la Tabla 4.1 se muestra el tamaño de las muestras satelitales en función el radio de la ventana espacial. Se presenta el tamaño de las muestras obtenidas en la totalidad de bahías que se analizará.

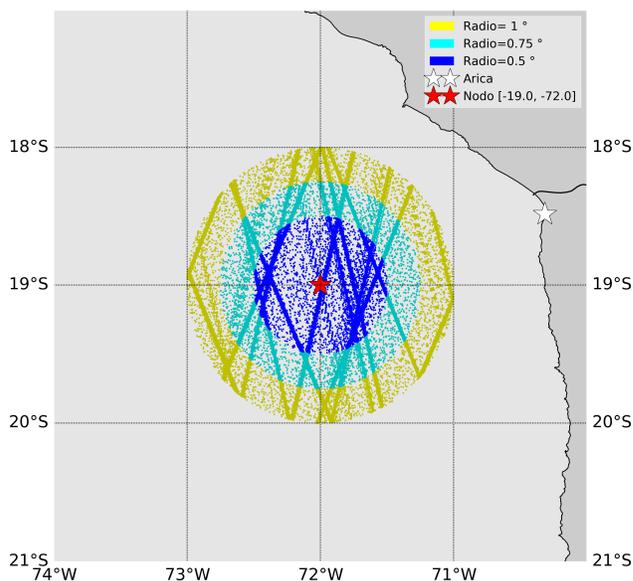


Figura 4.2: Ventanas espaciales, Arica.

Tabla 4.1: Tamaño de la muestra satelital según radio de la ventana espacial.

Nodo	Radio [°]	N° datos
Arica	0,5	30.630
	0,75	59.678
	1,0	108.378
Iquique	0,5	32.675
	0,75	74.170
	1,0	123.774
Mejillones	0,5	16.732
	0,75	49.983
	1,0	96.216
Valparaíso	0,5	30.181
	0,75	57.990
	1,0	103.778
Coronel	0,5	42.625
	0,75	77.413
	1,0	119.985

Todas las mediciones incluidas en los dominios espaciales deben haber sido realizadas en aguas profundas, o en otras palabras, no pueden haber sido realizadas a profundidades menores que los 1000 (o valores cercanos). A profundidades mayores o igual a la anterior, se considera valido suponer que el oleaje es independiente del fondo marino (aguas profundas). A continuación se muestra la distancia a la costa y la profundidad de la medición más somera de las ventanas de mayor radio en cada bahía (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Profundidad menor en ventana espacial de mayor radio (1°).

Nodo	Distancia a la costa [km]	Profundidad [m]
Arica	70	1.964
Iquique	91	4.000
Mejillones	52	4.580
Valparaíso	26	1.100
Coronel	33	1.370

Para complementar la información anterior, se dejó disponible en un repositorio online un archivo de “Google Earth” en el cual se puede ver la batimetría de las ventanas espaciales de radio mayor. Se debió recurrir a este software libre, debido a la imposibilidad de conseguir curvas de nivel. El archivo, “nodos.kml”, se puede descargar del siguiente link:

<https://github.com/tomas19/tesisTomasCuevas>

4.1.2. Filtro espacial N°2

En uno de los casos analizados, se observó que un dato con latitud cero se incluyó en la ventana espacial.

Esta etapa del filtrado de los datos es un complemento de la anterior, y podría ser redundante. Este proceso consiste en calcular la distancia entre las coordenadas de las mediciones seleccionadas con el proceso de filtrado anterior y las del nodo que se quiere calibrar.

Una vez calculada la distancia entre cada registro y el nodo, se eliminan todas las mediciones que presenten una distancia mayor al radio de la ventana espacial adoptado por el usuario. Si bien, con la rutina explicada en la sección 3.3.1. no debería ser necesario aplicar este filtro; se prefirió ser redundante, ya que el tiempo computacional que requiere es casi nulo y asegura que todos las mediciones rescatadas pertenezcan a la ventana espacial.

4.1.3. Filtro por calidad

Luego de eliminar todas las mediciones que estén fuera de la ventana espacial definida por el usuario, se debe definir la calidad de datos con que se quiere trabajar en la calibración. En las Figuras 3.2 y 3.3 se puede apreciar que la mayoría de las mediciones en Valparaíso tienen calidad cero. En la Tabla 4.3 se muestra el número exacto de datos para cada valor de la calidad.

Tabla 4.3: Tamaño de la muestra satelital en función de la calidad de la medición, Valparaíso.

Calidad	Tamaño muestra
2	15.796
1	2.326
0	81.550

De la tabla anterior se puede extraer que más del 80% de la muestra de datos frente a Valparaíso presenta calidad máxima. En la totalidad de los nodos, el porcentaje de datos con calidad dos y uno es despreciable, por lo que se optó trabajar solo con datos que presenten calidad máxima. La decisión anterior se reduce el tamaño de la muestra satelital, pero le resta incertidumbre a los resultados, ya que se sabe que todas las mediciones fueron realizadas de manera satisfactoria.

4.1.4. Filtro espacial N°3

Luego de seleccionar los datos con la calidad deseada, se desagrega el análisis generando una base de datos para cada satélite. El objetivo de este filtro es identificar todas las mediciones que realiza cada misión en un track.

Se decidió trabajar de esta manera, ya que existe la posibilidad que dos satélites pasen sobre la ventana espacial en tiempos cercanos. Si lo anterior sucediera, sería imposible separar las pasadas de las misiones solo por un criterio temporal, ya que además habría que tener en cuenta que misión efectuó el registro.

Generar una base de datos por satélite es simple, ya que al momento de almacenar las mediciones, se creó una columna con el nombre de la misión que la efectuó. Ahora, diferenciar los tracks de cada satélite es más complejo. Se calculó la diferencia temporal entre la medición i y la $i + 1$, si se

obtiene un resultado menor a un minuto, se considera que las mediciones fueron realizadas en la misma pasada del satélite. Por el contrario, si la diferencia es mayor, la medición $i + 1$ corresponde al primer registro de un nuevo track. En el caso de no haber desagregado el análisis, se podría dar el caso de que dos satélites pasen en instantes de tiempos muy cercanos sobre la ventana espacial; por lo que se podría obtener un Δt menor a un minuto, siendo las mediciones de diferentes misiones.

El paso previo a realizar el ajuste lineal para calibrar, es generar pares de datos de la forma $(Dato_{mod}, Dato_{sat})$, donde la medición debe estar cercana temporal y espacialmente al dato modelado.

Los satélites emiten cerca de 1.700 haces por segundo, por lo que en cada pasada sobre el dominio espacial, se tendrá más de una medición. Los datos modelados corresponden estados de mar cada una hora, por lo tanto dos datos medidos dentro del mismo track, no podrán estar asociados a diferentes datos modelados. En otras palabras, de cada track se rescatará una sola medición.

Al separar el análisis por satélites, es posible que un dato modelado esté asociado a dos registros diferentes. En el caso de que se diera lo anterior, no se tienen fundamentos para decidir cual aceptar como correcto, por lo que se optó por conservar ambos pares.

En el presente trabajo se presentan tres metodologías de calibración, donde dos difieren en la forma de seleccionar cuál es la medición satelital dentro del track que se usará para ser asociada. A continuación se detalla la forma en que se selecciona la medición a utilizar.

Filtro espacial N°3 (a): Selección del punto más cercano en el espacio

La metodología que se propone en esta sección consiste en seleccionar la medición satelital que presente la menor distancia espacial al dato modelado. En el esquema mostrado en la Figura 4.3 se muestra de manera gráfica lo anterior.

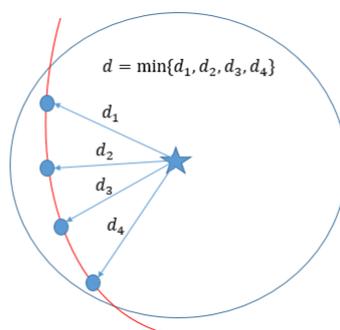


Figura 4.3: Selección de la medición más cercana espacialmente al nodo.

En el ejemplo anterior, se seleccionará la medición donde d_i corresponda a $d = \min(d_1, d_2, d_3, d_4)$.

Al seleccionar la medición que presente la menor distancia al nodo, se considera que se está seleccionando la medición que representa de mejor manera el estado de mar modelado. No se considera la medición efectuada con la menor diferencia temporal, ya que el desfase entre mediciones es prácticamente nulo. Además se probó la metodología de seleccionar el punto más cercano temporalmente, y se comprobó que resultados obtenidos entregaron correlaciones prácticamente nulas, por lo que se optó no agregar esta metodología en el informe.

Filtro espacial N°3 (b): Selección del dato promedio de cada track

A pesar de que se considera que la metodología anterior es físicamente correcta, puede darse el caso de que la medición que presente la menor distancia al nodo modelado no siga la tendencia del resto de registros, o que presente algún tipo de error no reportado. Al calcular el promedio de todos los parámetros registrados en una pasada dentro del dominio espacial, se reduce el efecto de posibles errores de medición. Si bien, solo se trabaja con datos de máxima calidad, el proceso de computo de la altura de ola mediante la rugosidad de la “huella” iluminada por el satélite en el mar, es complejo, y puede estar sujeto a errores.

En las Figuras 4.4 (a) y 4.4 (b) se puede apreciar la variación de la altura de ola en cada medición, y la distancia entre esta y el dato modelado. Las imágenes corresponden a un punto frente a las costas de Valparaíso.

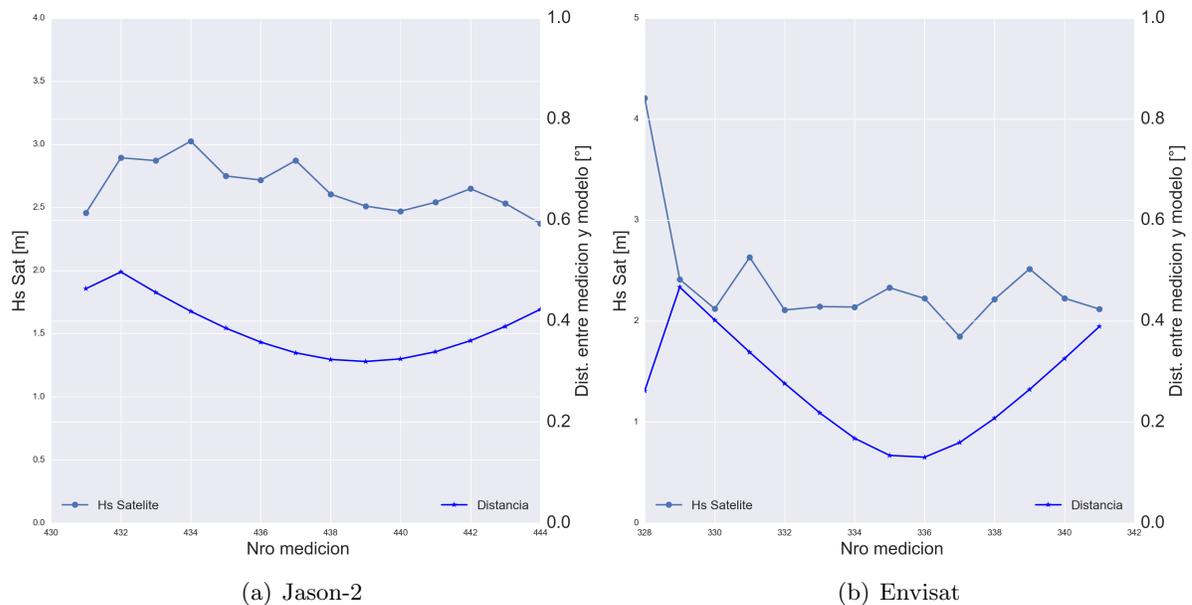


Figura 4.4: Variación de la altura de ola medida dentro de la ventana espacial, Valparaíso.

Debido al elevado número de pasadas que presenta cada satélite por las ventanas espaciales definidas, es imposible revisar una por una si el comportamiento es suave como el mostrado en el panel (a) de la figura anterior. Se seleccionó una pasada al azar para cada satélite para realizar el análisis anterior, y se comprobó que calcular el promedio de las variables medidas en el track parece una opción razonable.

En el panel (b) de la figura anterior, se puede apreciar una gran variabilidad en la altura de ola medida; el punto que presenta la menor distancia rompe la tendencia de los registros cercanos.

Finalmente, la base de datos satelitales generada con este filtro consiste en el promedio de las variables medidas en cada track.

4.1.5. Filtro temporal N°1

Luego de aplicar los filtros espaciales descritos, se debe definir un criterio temporal con el cual generar los pares de datos, ya que importa el desfase entre las salidas del modelo y las mediciones. Para generar las duplas, se considera el registro satélital más cercano temporalmente al dato simulado. Es posible que la diferencia temporal entre ambos sea importante; por ejemplo todos los datos modelados antes de 1985 se asociarán al dato satelital resultante de la primera pasada del satélite Geosat (ver Tabla 2.1). Debido a lo anterior, solo se considerarán los pares donde se cumpla que $|t_{mod} - t_{sat}| \leq 30$ minutos. Lo anterior se traduce en que solo se consideran las duplas donde el desfase temporal sea menor o igual a $\pm 0,5$ horas.

El tamaño de la muestra de información modelada tiene cerca de 271.000 datos por nodo, por lo que no es eficiente revisar dato a dato cual es el registro satelital que presenta la menor diferencia temporal; y verificar si cumple la condición de los 30 minutos.

El proceso de emparejamiento consiste en crear un DF (ver Sección 3.3.1) con los tiempos modelados como índice y la fecha de cada medición como encabezado de las columnas. En cada columna se repetirá el vector de salidas del modelo, transformándolo en una matriz de dimensiones $M \times S$; donde M es el total de datos modelados y S el total de datos medidos. Luego, al valor de cada celda se le debe restar el encabezado de su columna.

El resultado de lo anterior consiste en un nuevo DF que conserva el encabezado de las columnas y el índice, pero ahora cada celda contiene un parámetro Δ_{ms} , donde m es el índice del dato modelado y s el del dato satelital. En la Figura 4.5 se muestra de manera esquemática el proceso de emparejamiento de datos.

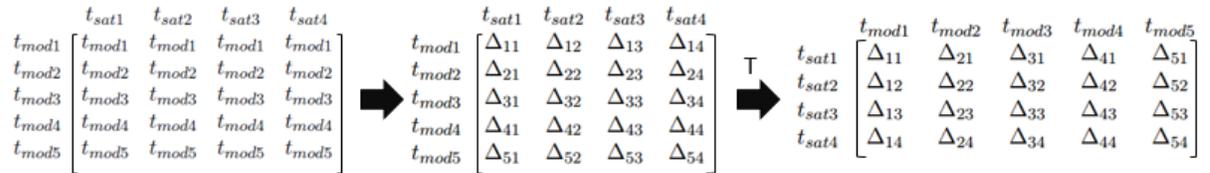


Figura 4.5: Metodología de emparejamiento de datos, parte n°1.

Una vez que se tiene el DF transpuesto, es posible encontrar el mínimo Δ_{sm} para cada columna y el índice de este valor; resultando en un nuevo DF con una estructura similar a la que se muestra a continuación.

Tabla 4.4: Formato DF con pares asociados.

Modelo	Satélite	Diferencia
t_{mod_1}	t_{sat_a}	Δ_{1a}
t_{mod_2}	t_{sat_b}	Δ_{2b}
t_{mod_3}	t_{sat_c}	Δ_{3c}
t_{mod_4}	t_{sat_d}	Δ_{4d}
t_{mod_5}	t_{sat_e}	Δ_{5e}

Dónde a, b, c, d, e son índices de datos satelitales. Puede darse que un dato satelital esté asociado a más de un dato modelado.

Finalmente, del DF anterior solo se consideran las filas donde la diferencia sea menor o igual a 30 minutos. Cabe mencionar que la metodología, al consistir en operaciones matriciales, disminuye de gran manera el tiempo computacional requerido.

La condición o ventana temporal de 30 minutos se adoptó debido a que se analizó la variabilidad de la altura significativa modelada en un mismo punto para distintos intervalos de tiempo. Se analizó como varía la diferencia porcentual de H_s en función del porcentaje acumulado de la información para los distintos intervalos de tiempo. Se encontró que para una ventana de ± 30 minutos y para el 99% de la información, la variación de la altura significativa es menor al uno por ciento. Debido a lo anterior se aceptó un desfase de hasta $\pm 0,5$ horas. Este parámetro es modificable por el usuario.

Vale la pena recordar que la base de datos medidos se encuentra desagregada por satélite, por lo que el proceso de emparejamiento se hace para cada uno por separado.

4.1.6. Filtro temporal N°2

Corresponde a la última etapa del proceso de filtrado de los datos. Con la base de datos obtenida a partir del filtro temporal N°1, es posible encontrar el mejor ajuste lineal entre los pares de datos. Sobre la base de la experiencia de PRDW, obtenida de una metodología de calibración de pronósticos de oleaje, se decidió comprobar si existe un desfase horario entre satélites y modelo que mejore la correlación de las duplas.

Se generó una rutina de programación que modificara la base de datos modelados original. Esta consiste en aplicar un desfase horario (adelantando y retrasando el modelo) y que, mediante el filtro anterior, realizara el emparejamiento. Luego busca el mejor ajuste por mínimos cuadrados y calcula el coeficiente R^2 . Lo anterior se realiza para un vector de desfases horarios de la forma $[-20, -19, \dots 0 \dots 20]$.

De la rutina se obtendrá un desfase temporal que maximizará el coeficiente de determinación del ajuste lineal de cada satélite por separado. Puede darse el caso de que para cada misión se obtengan “óptimos” para distintos desfases temporales. Finalmente, se aplican los desfases encontrados, se combina la información de las diferentes misiones y se realiza una regresión lineal.

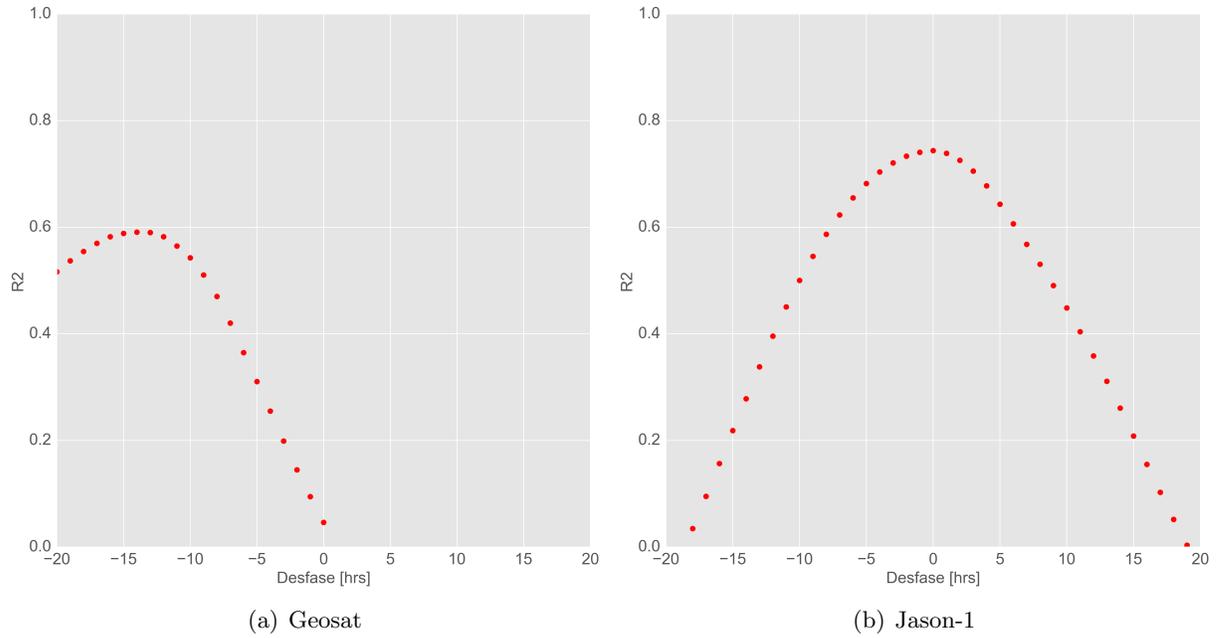


Figura 4.6: R^2 en función del desfase horario, Mejillones.

En la figura 4.6 se puede apreciar como varía R^2 en función del desfase. En el análisis realizado para la misión Geosat, se obtuvo que el coeficiente de determinación se maximiza con un desfase de -18 hr, aunque con un bajo coeficiente, lo que genera un grado de incertidumbre sobre la validez de la información reportada en esta ubicación. Estas imágenes son una buena herramienta para decidir qué misiones utilizar en cada calibración. Por ejemplo, debido al bajo valor de R^2 y al desfase óptimo, se optó por desestimar la información de la misión Geosat en la calibración del nodo de aguas profundas frente la bahía de Mejillones.

No se encontró información sobre existencia del “desfase óptimo” en la literatura. La hipótesis que se tiene, es que se debe a un error en la evolución temporal del modelo. Sin embargo, al existir diferentes desfases temporales que maximizan la correlación entre el modelo y las diferentes misiones, es también posible que el horario registrado para cada medición satelital presente algún tipo de defecto.

4.1.7. Resumen filtros

Tabla 4.5: Resumen de filtros utilizados.

Filtro	Función
Espacial 1	Selecciona las mediciones satelitales dentro de la ventana espacial definida por el usuario.
Espacial 2	Comprueba que la distancia entre cada medición y el nodo modelado sea menor o igual al radio del dominio espacial.
Por calidad	Descarta todas las mediciones que no tengan la calidad escogida por el usuario.
Espacial 3 (a)	Separa el análisis por satélites y considera el registro más cercano espacialmente al dato modelado para generar los pares.
Espacial 3 (b)	Separa el análisis por satélites y considera el promedio de las mediciones realizadas en cada pasada para generar los pares.
Temporal 1	Asocia los datos medidos a los modelados generando los pares.
Temporal 2	Comprueba la existencia de un desfase entre ambas bases de datos que mejore la correlación.

4.2. Calibración con punto más cercano en el espacio (PMC)

Esta metodología consta de los filtros espacial N°1, espacial N°2, por calidad, espacial N°3 (a), y ambos filtros temporales. Cabe mencionar que debido al alto número de figuras obtenidas (tres metodologías, cinco nodos y 3 ventanas espaciales), se decidió mostrar solo los resultados obtenidos en Valparaíso con la ventana de menor radio. El total de las figuras se pueden encontrar en el mismo repositorio online que se mencionó en la sección anterior.

4.2.1. Calibración de la altura de ola

En la Figura 4.7 se puede ver la distribución temporal de la serie medida y la modelada. La información satelital se muestra filtrada por calidad y espacialmente.

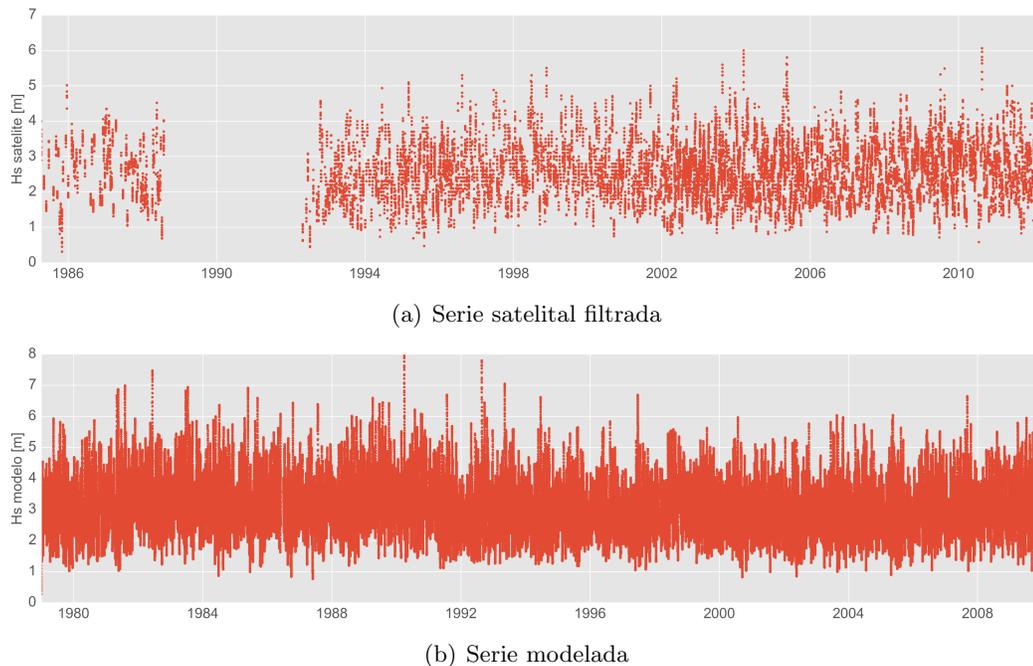


Figura 4.7: Series de oleaje medido y modelado frente a Valparaíso.

En el panel superior de la figura anterior se puede apreciar nuevamente que cerca del año 1991 no se registraron mediciones satelitales, ya que en esa fecha no había satélites orbitando capaces de medir parámetros de las olas.

El objetivo es encontrar las mediciones mostradas en la Figura 4.7 (a) que sean asociables a los datos modelados del panel (b). Una vez realizado el “emparejamiento” de los datos, se debe encontrar el mejor ajuste lineal, con el que se calibrará el total de la serie modelada.

Se puede apreciar que solo se cuenta con información satelital desde 1986 aproximadamente, por lo que la calibración se extenderá para periodos no coincidentes en ambas series.

Se proponen dos métodos para encontrar una familia de ajustes. El primero consiste en utilizar el intervalo de confianza entregado en el ajuste lineal. Este corresponde a un rango de valores donde, con una seguridad de $x\%$, se encuentra el valor de la pendiente. La segunda metodología corresponde al método de regresión por cuantiles, el cual utiliza porciones de la distribución condicional

de una variable con respecto a la otra, generando diferentes ajustes lineales. Por ejemplo, para el cuantil 0,4; la metodología entrega el mejor ajuste lineal que deja el 40% de los puntos bajo la recta de la regresión. En los anexos se presenta una explicación más detallada de esta técnica matemática.

La finalidad de generar una familia de climas de oleaje es obtener un clima de oleaje calibrado minorado, uno central y otro mayorado para cada nodo. Luego la familia de climas de oleaje será implementada en proyectos de ingeniería para obtener un rango de posibles resultados.

En la Figura 4.8 se muestran los ajustes obtenidos mediante ambos métodos.

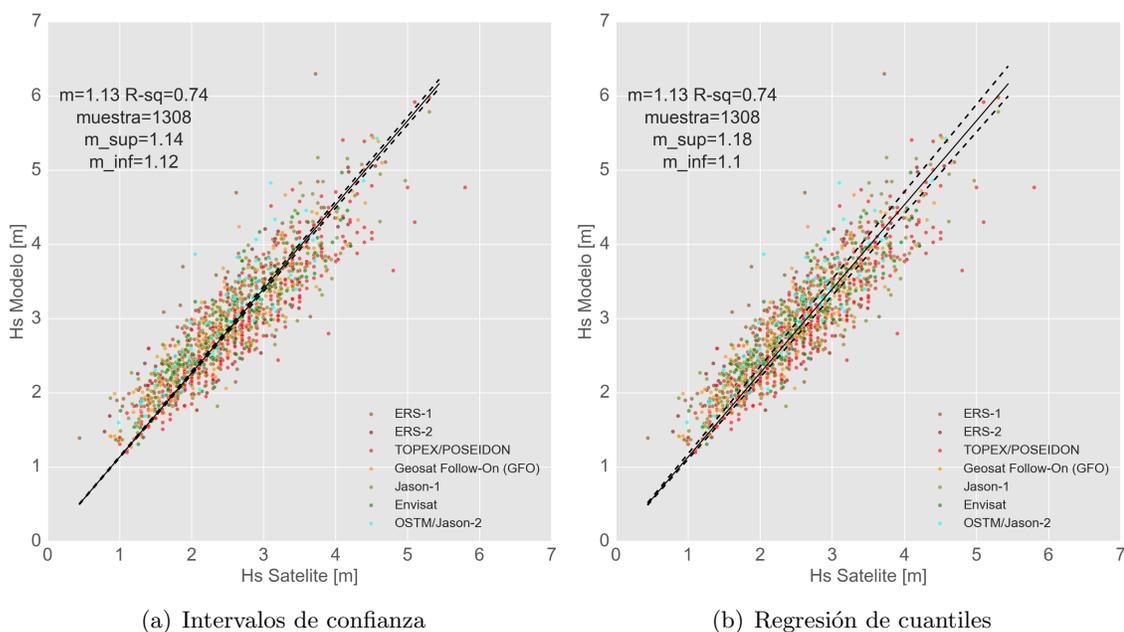


Figura 4.8: Familia de ajustes lineales obtenidos con metodología PMC, Valparaíso.

Es importante mencionar que el ajuste central, en ambos casos, se obtuvo mediante mínimos cuadrados.

En el panel (a) de la figura anterior, los ajustes envolventes se encontraron con un intervalo de confianza del 98 por ciento; mientras que en el panel (b), con los cuantiles 0,6 y 0,4.

En la Figura 4.8, el color de los puntos corresponde al satélite que efectuó la medición. En la leyenda se puede apreciar que no se incluyó la misión Geosat, ya que mediante el filtro temporal N°2 se decidió obviar esta información.

El ajuste lineal mostrado en las figuras anteriores es de la forma $y = mx$. Es directo apreciar que la nube de puntos sugiere una pendiente menor y un intercepto positivo, pero con un ajuste de la forma $y = mx + n$ se tendrían dificultades para calibrar olas de altura menor al intercepto. Lo anterior se debe a que para calibrar, a los datos modelados se les aplica la ecuación $x = \frac{y-n}{m}$, entonces para datos donde $y < n$, la altura calibrada resultará negativa.

En la Figura 4.8 se puede apreciar que las envolventes están muy ajustadas a la recta central. Por simple inspección visual, la nube de puntos presenta una dispersión considerable como para que las pendientes de las curvas envolventes sean tan cercanas al ajuste lineal. En la Figura 4.9 se puede ver como se distribuyen los puntos utilizados en la regresión lineal.

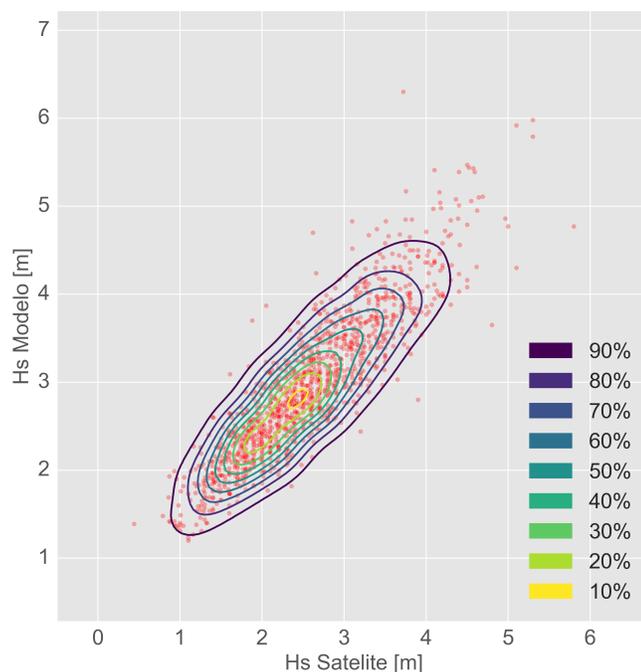


Figura 4.9: Distribución de los puntos en regresión lineal, metodología PMC. Valparaíso.

El gráfico anterior muestra como se distribuye la densidad de puntos en la nube. Se aprecia que cerca del 70% de los pares, se encuentra en una región acotada alrededor del centro del total de datos. Lo anterior respalda el resultado obtenido en las curvas envolventes (ver Figura 4.8), puesto que como la mayoría de los pares se encuentran cerca del centro de la nube, es lógico que los ajustes exteriores resultaran con una pendiente similar al central. Además permite concluir sobre la calidad de la base de datos, ya que si en la Figura 4.9 se apreciara una mayor dispersión en el total de datos, se generaría cierta incertidumbre sobre la consistencia de ésta.

Se esperaba que la pendiente del ajuste central resultara cercana a 1, por lo que se decidió analizar si existe alguna relación entre la distancia de la medición al punto modelado y la pendiente del ajuste. En otras palabras, se verificó que los puntos más alejados de una supuesta recta con pendiente 1:1 no presentaran una mayor distancia.

En la Figura 4.10 se muestra la escala de color usada para representar la distancia entre la medición y el punto modelado.

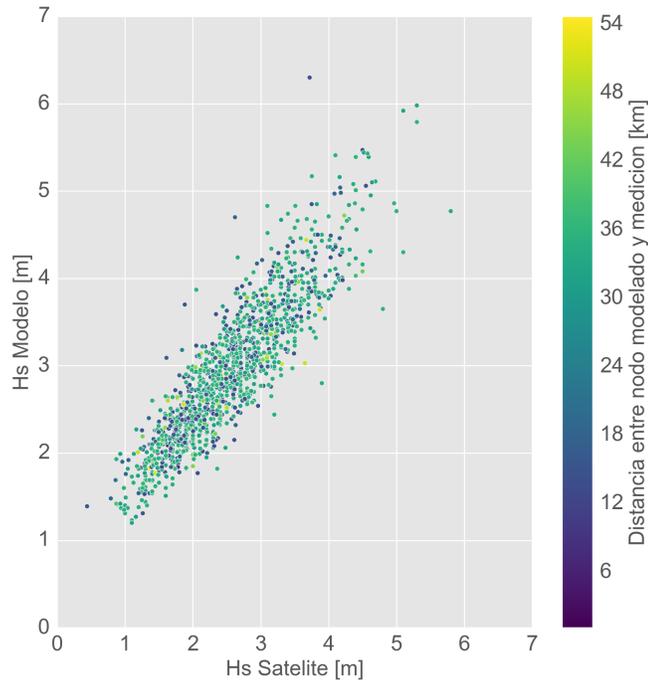


Figura 4.10: Ajuste lineal según distancia entre medición y nodo, Valparaíso. Metodología PMC.

Se puede apreciar que no existe una clara relación entre la ubicación de los puntos en la nube con el parámetro de distancia, por lo que no fue necesario utilizar un nuevo filtro espacial.

Obtener pendientes mayores que la unidad significa que el modelo sobrestima la altura de ola, por lo que luego de calibrar el clima de oleaje, las alturas resultarán menores que las originales. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 4.11.

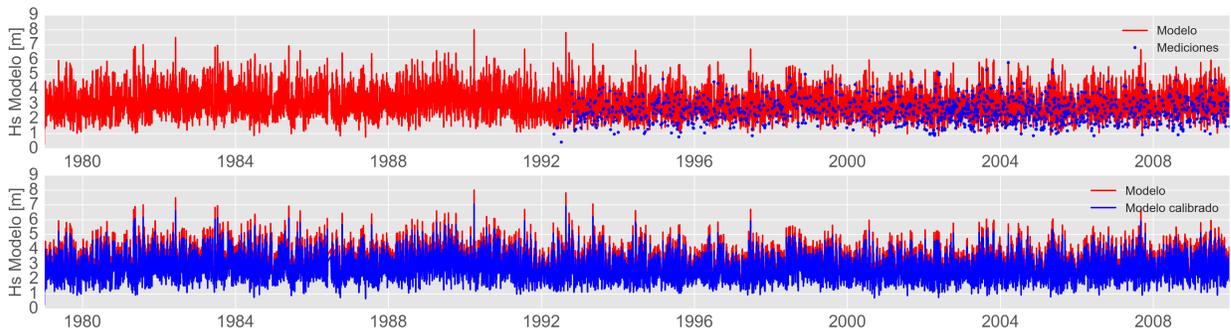
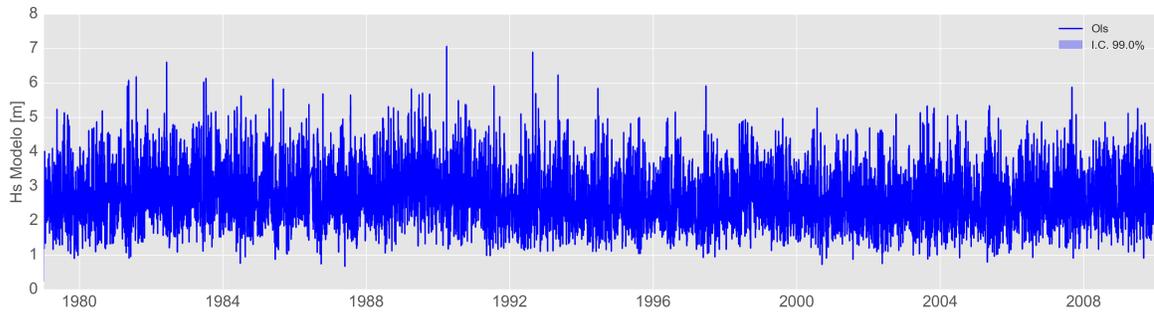


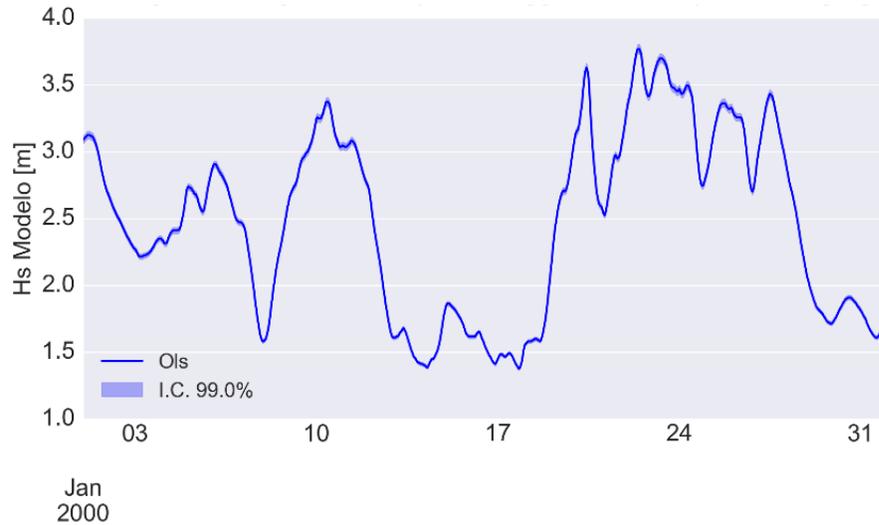
Figura 4.11: Altura de ola calibrada con metodología PMC, Valparaíso.

En el panel superior de la figura anterior se pueden observar los datos satelitales que se usaron para calibrar la serie modelada. Como no se utilizaron registros previos a 1992, prácticamente la mitad de la serie simulada será ajustada con mediciones no coincidentes. Por otro lado, en el panel inferior se comprueba que la calibración redujo los valores de la altura de ola. Es importante mencionar que las mediciones satelitales contienen datos de tormenta.

En el panel superior de la Figura 4.12 se muestra la aplicación de la familia de climas de oleaje generada mediante el método de los intervalos de confianza. El panel inferior corresponde a un acercamiento a un periodo determinado.



(a) Calibración aplicando familia de ajustes



(b) Calibración aplicando familia de ajustes, Enero del 2000

Figura 4.12: Calibración con familias de ajustes lineales mediante metodología PMC, Valparaíso.

En el panel inferior de la figura anterior se puede apreciar que los ajustes envolventes entregan una banda de resultados posibles. Lo anterior es relevante, ya que debido a la complejidad de los cálculos realizados en la mayoría de modelos en ingeniería de costas, es imposible realizar una propagación de errores. Con esta metodología se obtendrá un rango de climas de oleaje que serán usados como datos de entrada en diferentes modelos, por lo que se podrá obtener rangos de resultados.

Como último producto de la metodología de calibración se muestra la Figura 4.13 correspondiente a la curva de porcentaje de no excedencia, con las envolventes generadas mediante ambas metodologías.

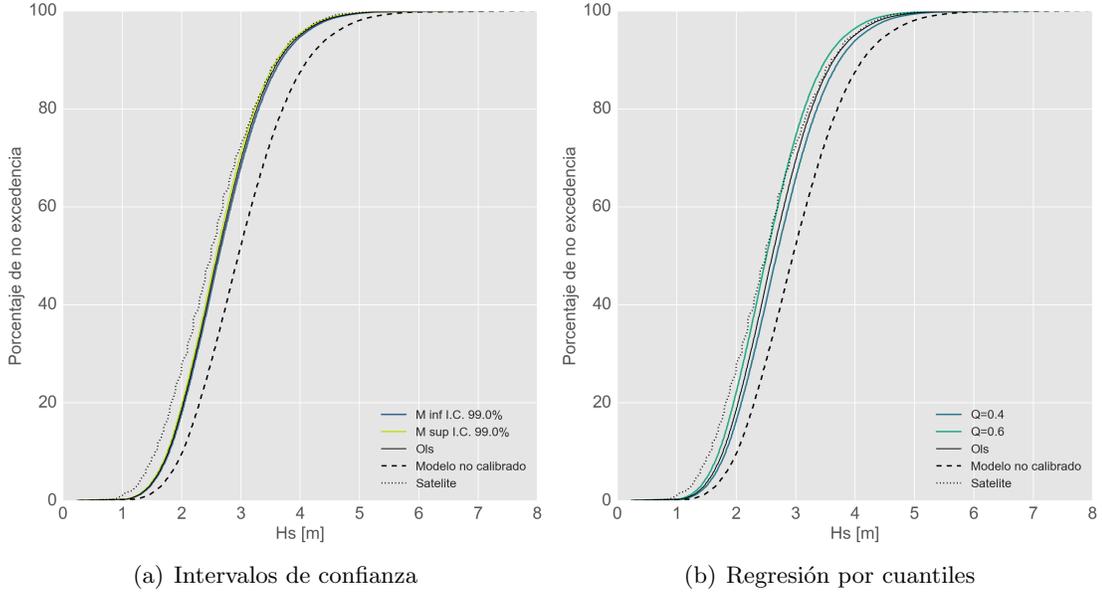


Figura 4.13: Porcentaje de no excedencia con metodología PMC, Valparaíso.

Los gráficos anteriores permiten cuantificar el porcentaje de ocurrencia de un evento de cierta altura de ola; por ejemplo, se puede estimar que el 50% del tiempo, se tienen olas menores a 2.5 m aproximadamente.

Es importante señalar, que en el primer intento de realizar el ajuste lineal, se siguió un camino diferente con el orden de los filtros; se priorizó la cercanía temporal antes que la espacial. La metodología que se desarrolló consistió en seleccionar todas los registros dentro de la ventana espacial, y luego elegir la medición más cercana temporalmente a cada dato modelado. Si el desfase temporal entre los componentes del par resultaba mayor a 30 min, éste se eliminaba. Los resultados obtenidos fueron coeficientes de determinación cercanos a 0,2, por lo que se descartó la metodología y se debió recurrir a los filtros espacial 3 y temporal 2 (ver Tabla 4.5).

4.2.2. Calibración del periodo

Cálculo del periodo con información de radares de apertura real (RAR)

La información satelital disponible en el proyecto GlobWave no presenta mediciones del periodo de las olas. Este parámetro es fundamental para realizar una descripción, con valor ingenieril, del estado de mar.

En la literatura existen modelos con los cuales es posible calcular el periodo de las olas mediante datos altimétricos, estos dependen principalmente de la altura de ola, H_s y del coeficiente de *backscatter*, σ_0 . En Mackay et al. 2008 se presenta un modelo paramétrico y una comparación de este, con otros dos métodos de cálculo del periodo ya existentes. A continuación se muestran las ecuaciones del modelo “Two Piece Model”.

$$T = \begin{cases} \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\sigma_0 - A}{H_s + \gamma} \right) \right] & \text{si } \sigma_0 \leq \delta \\ \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\delta - A}{H_s + \gamma} \right) \right] & \text{si } \sigma_0 > \delta \end{cases} \quad (4.1)$$

Los parámetros α , β , A y δ están calibrados para los misiones Topex, Jason1, ERS-2, Envisat y GFO, por lo que solo se podrá calcular el periodo para las mediciones reportadas por estos satélites.

La expresión del modelo fue obtenida mediante métodos matemáticos, comparando registros de las misiones mencionadas con datos de boyas del *National Data Bouy Center*¹⁹ de la NOAA.

En la Figura 4.14 se muestra la distribución temporal del periodo calculado a partir de este método y del periodo modelado en fechas coincidentes.

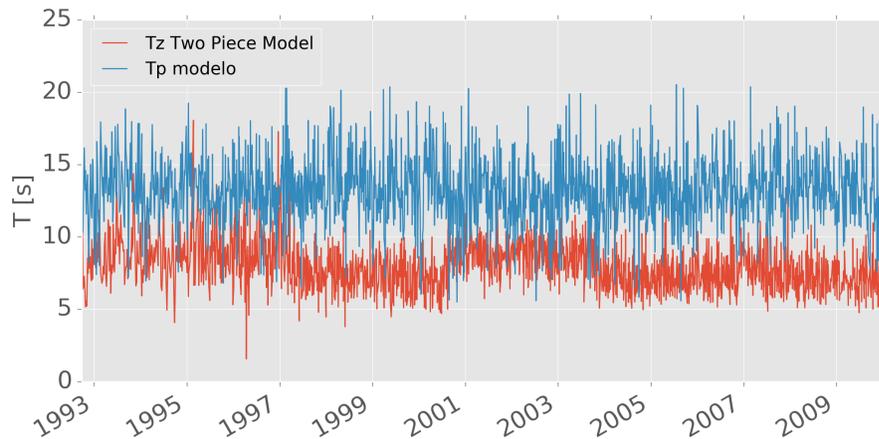


Figura 4.14: Periodo modelado y periodo calculado con “Two piece model”, Valparaíso. Metodología PMC.

La serie calculada presenta valores más bajos que los observados usualmente en las costas de nuestro país (12-16 s). Lo que puede deberse a que el modelo fue calibrado con mediciones cercanas al Reino Unido, donde generalmente las olas presentan periodos más cortos.

En la Figura 4.15 se puede ver el gráfico de dispersión obtenido con los pares extraídos del gráfico anterior.

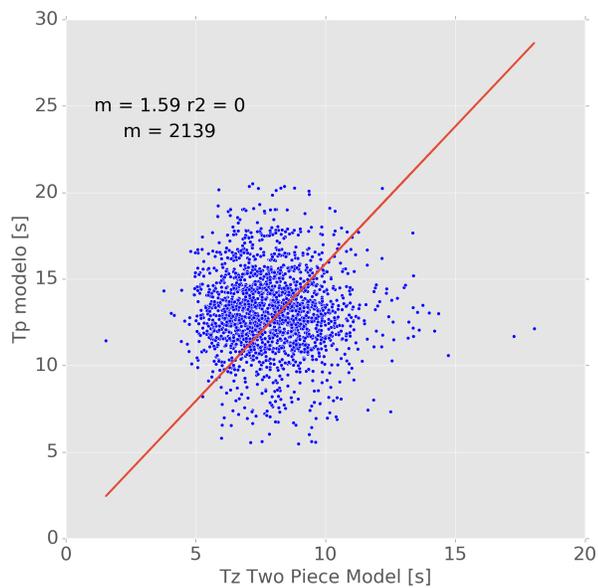


Figura 4.15: Ajuste lineal de periodos RAR, Valparaíso. Metodología PMC.

¹⁹<http://www.ndbc.noaa.gov/>

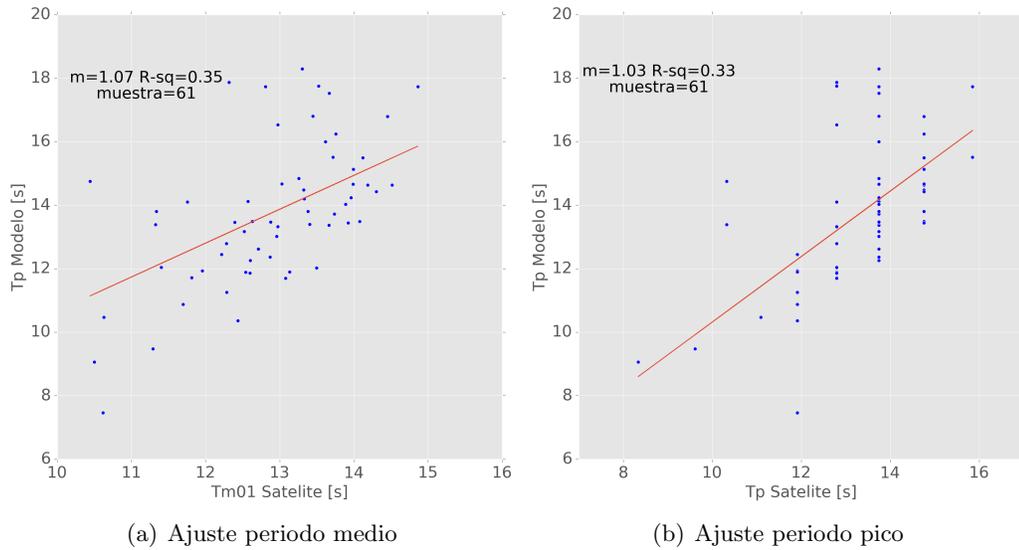


Figura 4.17: Ajuste lineal para periodos calculados con información SAR, Valparaíso. Metodología PMC.

La correlación obtenida es prácticamente nula, por lo que se decidió descartar esta metodología en lo que sigue del trabajo.

Calibración del periodo con información de radares de apertura sintética (SAR)

La metodología utilizada para calcular el periodo a partir de datos de radares SAR se presentó en la sección 3.3.2. Cabe recalcar que el número de datos de este tipo de información es del orden del 0.1 % de la información modelada que se debe calibrar, lo que se puede apreciar en la Figura 4.16.

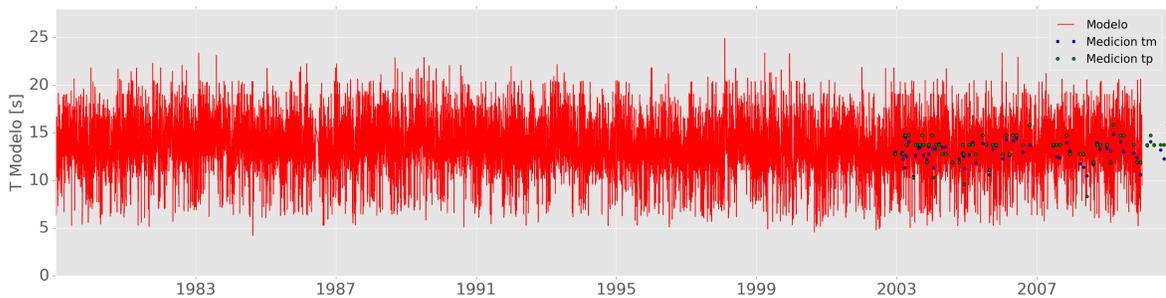


Figura 4.16: Serie de periodos modelados y mediciones SAR, Valparaíso. Metodología PMC.

Es posible concluir que el número de mediciones es insuficiente para calibrar una serie de tal extensión. Finalmente se muestran los ajustes lineales obtenidos para el periodo pico y periodo medio con sus respectivos pares de datos modelados (ver Figura 4.17).

Nuevamente la correlación es muy baja, y debido a lo mencionado sobre la extensión temporal de la serie, no se intentará calibrar el periodo mediante información obtenida con radares SAR en las otras metodologías.

Sumando a lo último el resultado de la sección anterior, se descarta la posibilidad de calibrar la serie de periodos modelados.

4.2.3. Calibración de la dirección de propagación del oleaje

Al igual que para el periodo, se presentan dos métodos de cálculo de la dirección de propagación de las olas.

Calibración de la dirección con información RAR

Los radares de apertura real no entregan de manera directa información sobre la dirección de propagación de las olas, pero sí entregan las velocidades ortogonales del viento.

El oleaje se genera en el sentido del viento dentro de la zona de generación. Al propagarse fuera de ésta puede encontrarse con vientos cruzados en incluso opuestos, y no cambiar su dirección (salvo algunas excepciones en oleaje de periodo muy corto). De todas formas se asumirá que las olas en aguas profundas se propagan en la misma dirección en que “sopla” el viento, esperando realizar un hallazgo útil.

Es posible calcular la dirección del oleaje mediante la siguiente fórmula.

$$D = \frac{180}{\pi} \arctan 2 \left(\frac{u}{v} \right) \quad (4.2)$$

dónde u y v son las velocidades ortogonales del viento. La función “arctan2”, disponible en el paquete “numpy”²⁰, es una variación de la función arcotangente original, ya que reconoce el cuadrante del resultado mediante los signos de las variables u y v . En la Figura 4.18 se puede ver la serie calculada con la fórmula anterior. Además, se muestra la serie de direcciones modeladas.

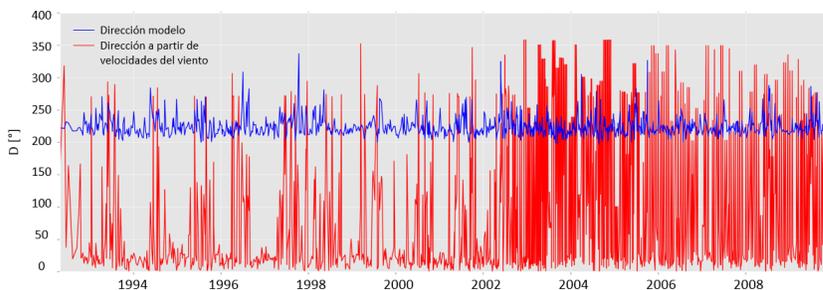


Figura 4.18: Serie de direcciones modeladas y calculadas, Valparaíso. Metodología PMC.

Se puede apreciar que las series presentan pocas similitudes, por lo que se decidió no realizar una regresión lineal entre ambas variables. Lo anterior puede deberse a que las olas adquieren su dirección de propagación dentro de la tormenta en la que se forman, y los satélites miden vientos locales dentro de la ventana espacial asignada.

Dado lo anterior, se concluye que la metodología propuesta no es válida.

Calibración de la dirección con información SAR

Ya se comprobó que la cantidad de mediciones efectuadas por radares tipo SAR son insuficientes para calibrar las series modelada. A pesar de lo anterior, se mostrará la metodología de cálculo de

²⁰<http://www.numpy.org/>

la dirección a partir de este tipo de información.

En la Figura 4.19 se muestra la serie de direcciones modeladas; y sobre ella, las mediciones del espectro.

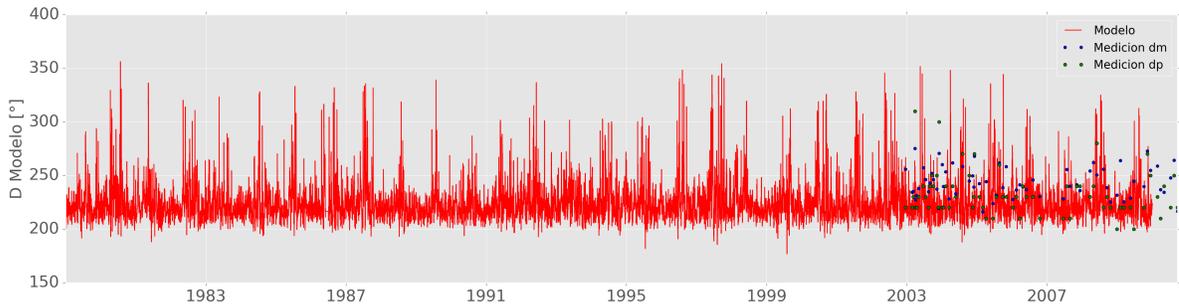


Figura 4.19: Serie de direcciones modeladas y medidas, Valparaíso. Metodología PMC.

En la Figura 4.20 se muestran los ajustes lineales obtenidos.

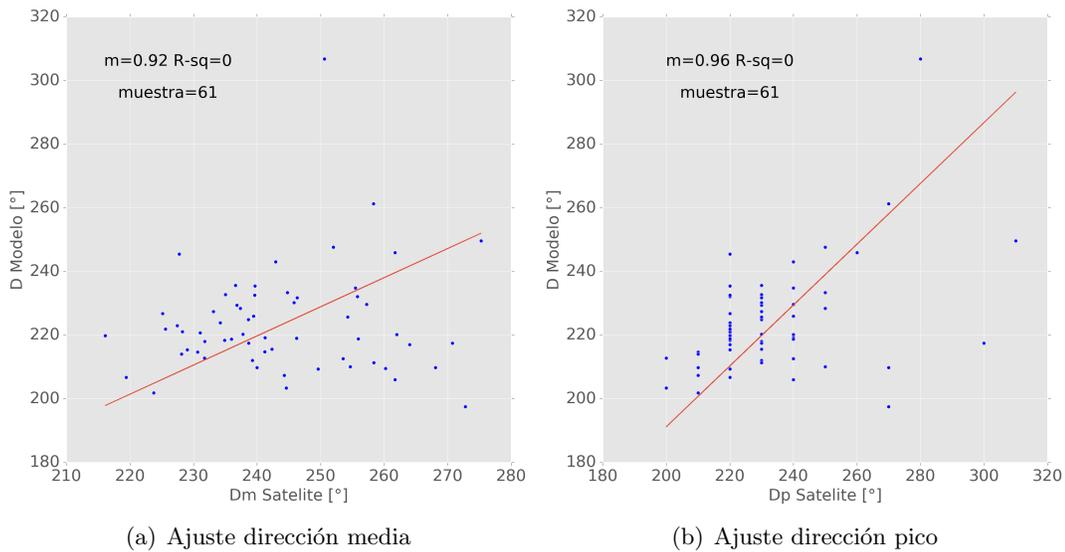


Figura 4.20: Ajuste lineal direcciones calculadas con información SAR, Valparaíso.

Nuevamente se obtuvo una correlación nula, por lo que no es posible generar una calibración de la dirección modelada con información espectral.

En la literatura existen artículos donde se exponen metodologías para extraer parámetros de las olas a partir de información espectral, entregada por radares SAR. En estos no se especifica la fuente de información, y generalmente, se menciona que la información es extraída de imágenes; por lo que puede ser que el tipo de datos usados en este trabajo no sea de características similares.

Debido a las bajas correlaciones obtenidas en los ajustes de periodo y dirección, en el resto del informe solo se presentarán las calibraciones de la altura de ola.

4.3. Calibración con dato promedio del track (PROM)

Esta metodología de calibración difiere de la anterior solo en que se usa la versión (b) del filtro espacial N°3 (ver Tabla 4.5)

Calibración de la altura de ola

En as Figura 4.21 se muestran los ajustes lineales obtenidos a partir de ambos métodos de generación de familias de climas de oleaje.

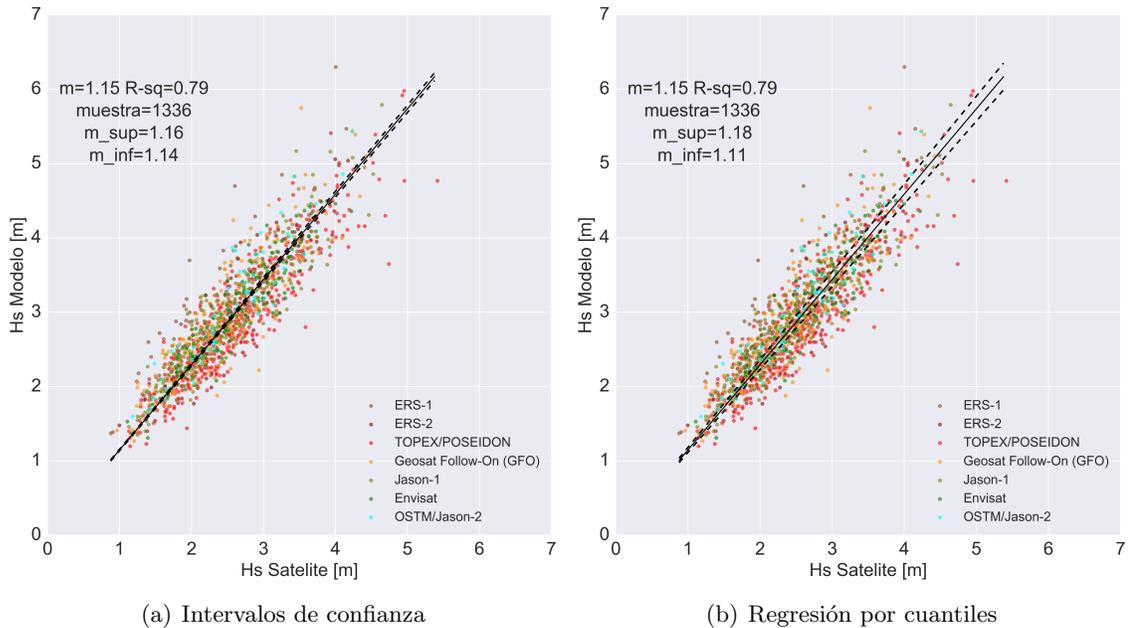


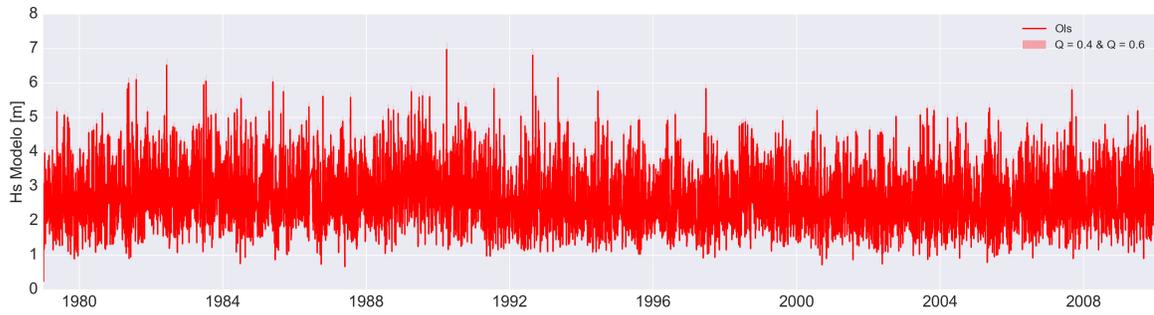
Figura 4.21: Familia de ajustes lineales obtenidos con metodología PROM, Valparaíso.

Mediante esta metodología se obtuvo una pendiente levemente mayor que en el caso anterior. Se esperaba que al promediar las mediciones de cada track, reduciendo posibles errores, la pendiente obtenida fuera más cercana a uno; se sabe que esto no se debe a la distancia entre los registros y los datos simulados. La figura que muestra la nube de puntos caracterizando lo anterior se adjunta en los anexos.

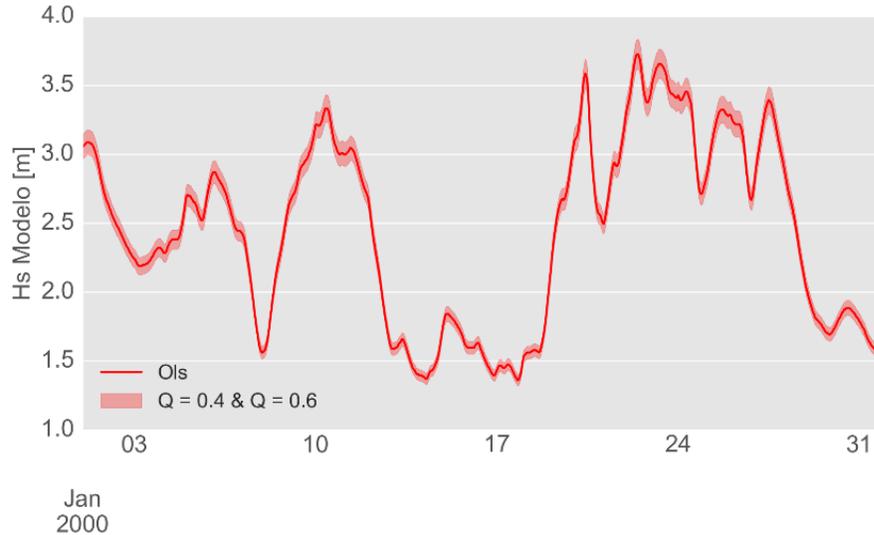
Por otro lado, el tamaño de la muestra aumentó en 28 pares (la calibración con la metodología anterior se realizó con 1.308 pares), lo que no representa un cambio significativo.

El coeficiente de determinación también aumentó. Este valor representa la proporción de varianza de los datos modelados explicada por los datos satelitales. En otras palabras, mientras más cercano a uno, mejor será la bondad de ajuste del modelo de regresión lineal.

En la Figura 4.22 se muestra la serie de tiempo calibrada obtenida a partir del método de regresión por cuantiles.



(a) Calibración aplicando familia de ajustes



(b) Calibración aplicando familia de ajustes, enero del 2000

Figura 4.22: Calibración con familia de ajustes lineales, Valparaíso. Metodología PROM.

En el panel (b) de la figura anterior, es directo apreciar que el ancho de la banda entregada por la regresión por cuantiles es mayor que la obtenida a partir del método de intervalos de confianza (ver Fig. 4.8).

El mayor espesor de la banda envolvente repercutirá en que el intervalo de resultados obtenidos en los diferentes modelos sea mayor. Lo anterior reducirá en cierto grado la incertidumbre existente en los modelos utilizados en ingeniería de costas.

En la Figura 4.23 se muestran los gráficos del porcentaje de no excedencia obtenidos con ambos métodos de generación de familias.

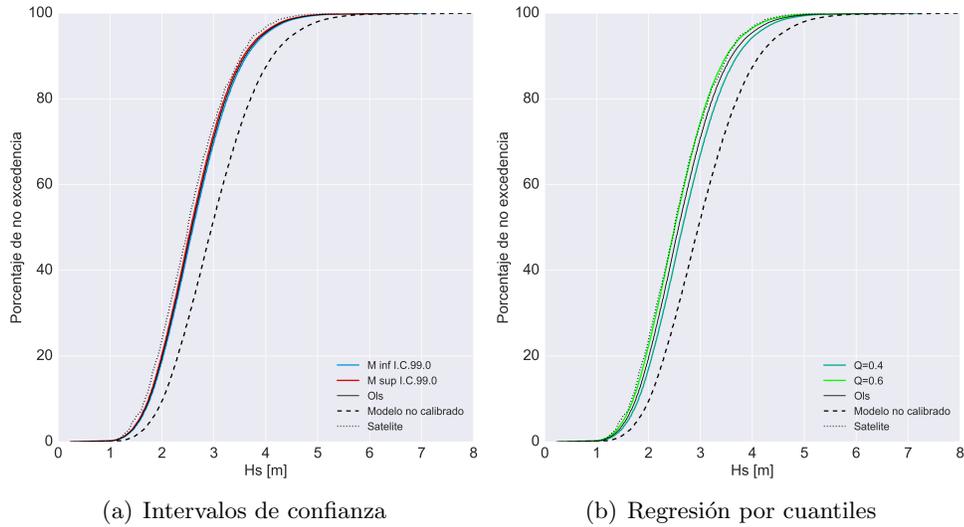


Figura 4.23: Porcentaje de no excedencia obtenido con metodología PROM, Valparaíso.

La diferencia entre la regresión por cuantiles y el método de intervalos de confianza, es que este último entrega el rango de variabilidad del mejor ajuste obtenido. Si la distribución condicional de probabilidades es simétrica, este ajuste corresponde al cuantil 0,5. La elección de las porciones a usar en el otro método son arbitrarios y no están relacionados al ajuste obtenido por mínimos cuadrados.

4.4. Calibración paramétrica (CP)

Corresponde a una sensibilización de la metodología presentada en la sección anterior. Utiliza los mismos procesos de filtrado de datos, pero al momento de realizar el ajuste lineal, se generan diferentes casos según dirección de propagación, periodo y altura de oleaje. En la Figura 4.24 se puede ver un ejemplo del esquema de trabajo.

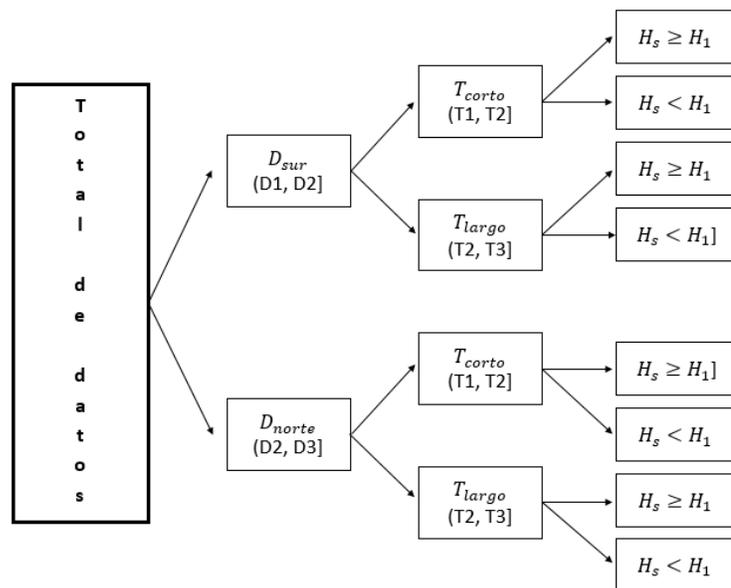


Figura 4.24: Esquema funcionamiento calibración paramétrica.

Según la figura anterior, se generarán 8 ajustes distintos, uno por cada rama del “árbol”. La finalidad de esta metodología es diferenciar el análisis para frentes de oleaje que provengan de diferentes direcciones, para oleaje tipo *sea*²¹ o *swell*²², y para alturas de operación o diseño.

No se busca definir cual es el periodo para diferenciar oleajes tipo *sea* o *swell*, ni entregar un corte en las alturas de ola para diferenciar entre operación y diseño. La metodología desarrollada permite al usuario tomar la decisión de cuantos intervalos utilizar para los parámetros de altura, dirección y periodo; y también los límites de cada rango.

En el caso de que una rama del “árbol” resulte vacía, dicho de otra manera, que no existan pares de datos que cumplan con una condición de altura (última etapa de diferenciación), la rutina buscará el ajuste realizado en la etapa anterior, es decir, en el corte de periodos. Si tampoco se tienen datos, se busca en el corte de direcciones. Si nuevamente no se tienen datos en esa etapa, se utiliza el resultado entregado por la metodología explicada en la sección anterior.

Por ejemplo, (ver Fig. 4.24) si en la rama de D_{sur} , T_{corto} , y $Hs < H_1$ no se tienen datos para generar un ajuste, la rutina busca el ajuste de la combinación D_{sur} y T_{corto} sin diferenciar el análisis por alturas.

En la Figura 4.25 se muestra la comparación, mediante el gráfico del porcentaje de no excedencia, de la metodología promedio con la presentada en esta sección. Las bandas se generaron con el método de intervalos de confianza.

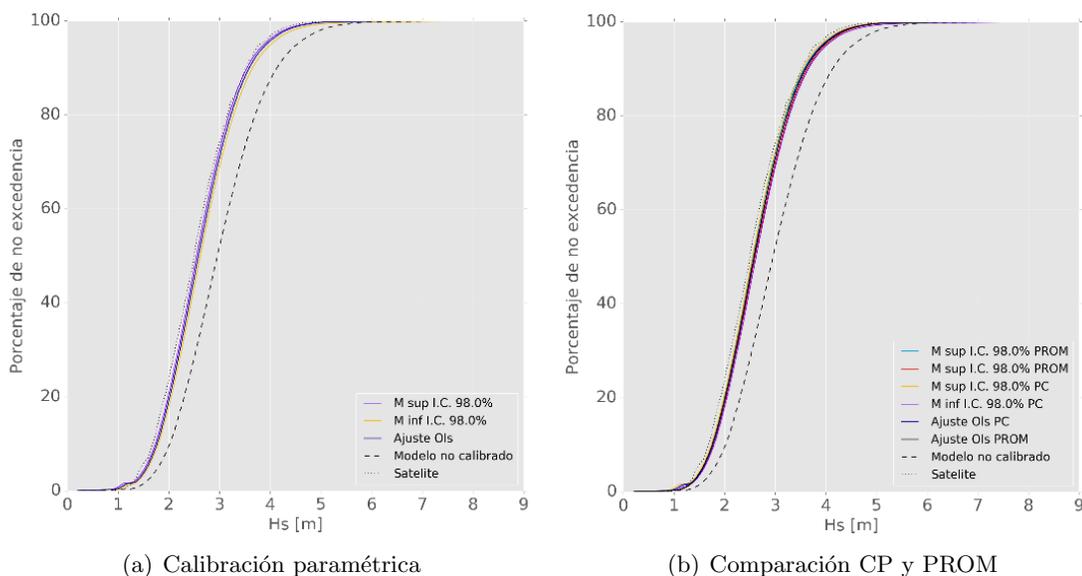


Figura 4.25: Comparación porcentaje de no excedencia, Valparaíso. Metodologías CP y PROM.

En el panel (b) de la figura anterior se puede apreciar que las bandas son muy ajustadas, por lo que se puede concluir que los resultados entregados por ambas metodologías, con el set de datos utilizado, son similares.

²¹Oleaje de cresta corta y desordenado, que se desarrolla dentro de la zona de generación de oleaje

²²Oleaje de cresta larga y ordenado, que se propaga fuera de la zona de generación

Por ultimo, la rutina genera un resumen de la pendiente usada para calibrar cada combinación en ca cada clima de la familia. Además se agrega el tamaño de la muestra con que se realizó el ajuste, y el coeficiente de determinación.

A continuación, en la Tabla 4.6, se pueden apreciar los valores obtenidos en el nodo de Valparaíso, donde se utilizaron las mismas combinaciones que las mostradas en la Figura 4.24. Las direcciones de propagación se discretizaron según si correspondían al cuadrante III o IV, el corte de los periodos se realizó en 12 s, y por último, se consideró que las alturas de operación son menores o iguales a 1,5 metros.

Tabla 4.6: Resumen resultados calibración paramétrica, Valparaíso.

	mi ²³	ols ²⁴	ms ²⁵	R^2	Muestra
$D \in (176, 270], T \in (0, 12], H_s \in (0, 1,5]$	1,19	1,27	1,36	0,23	33
$D \in (176, 270], T \in (0, 12], H_s \in [1,5, 20]$	1,1	1,11	1,13	0,71	362
$D \in (176, 270], T \in (12, 25], H_s \in (0, 1,5]$	1,24	1,31	1,37	0,29	45
$D \in (176, 270], T \in (12, 25], H_s \in (1,5, 20]$	1,15	1,16	1,17	0,77	876
$D \in (270, 360], T \in (0, 12], H_s \in (0, 1,5]$	1,01	1,1	1,18	0,78	16
$D \in (270, 360], T \in (0, 12], H_s \in (1,5, 20]$	1,01	1,1	1,18	0,78	16
$D \in (270, 360], T \in (12, 25], H_s \in (0, 1,5]$	0,65	1,19	1,73	0,05	4
$D \in (270, 360], T \in (12, 25], H_s \in (1,5, 20]$	0,65	1,19	1,73	0,05	4

En las últimas cuatro filas de la tabla se aprecian resultados repetidos, lo que puede deberse a que existen combinaciones que no se dan dentro de los climas de oleaje analizados.

²³Pendiente inferior.

²⁴Ajuste central.

²⁵Pendiente superior.

5. Validación de metodologías

En este capítulo se presenta una comparación entre los climas de oleaje calibrados y mediciones de boyas. Las mediciones de boyas fueron adquiridas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

Es importante mencionar que previo a la comparación, se propagó las familias de climas de oleaje de aguas profundas hacia la ubicación de las boyas. La metodología de propagación se describe en los anexos.

Se presentan las comparaciones de los resultados obtenidos con las tres metodologías presentadas en las bahías de Iquique y Valparaíso, ya que solo se cuenta con datos de estas zonas. Ambas boyas a utilizar son modelo Triaxys²⁶.

5.1. Validación del clima de oleaje de Iquique

En la Tabla 5.1 se muestran las coordenadas de la boya y del nodo de aguas profundas de Iquique. Ambos puntos se encuentran a 200 km aproximadamente.

Tabla 5.1: Ubicación boya Iquique.

	lon [°]	lat [°]	Profundidad estimada [m]
Nodo aguas profundas	-72,0	-20,0	5.840
Boya Triaxys	-70,148	-20,149	200

Los climas comparados se obtuvieron adoptando una ventana temporal de 0,5 horas y $0,5^\circ$ como radio del dominio espacial. A continuación se muestran las regresiones lineales obtenidas (ver Fig. 5.1).

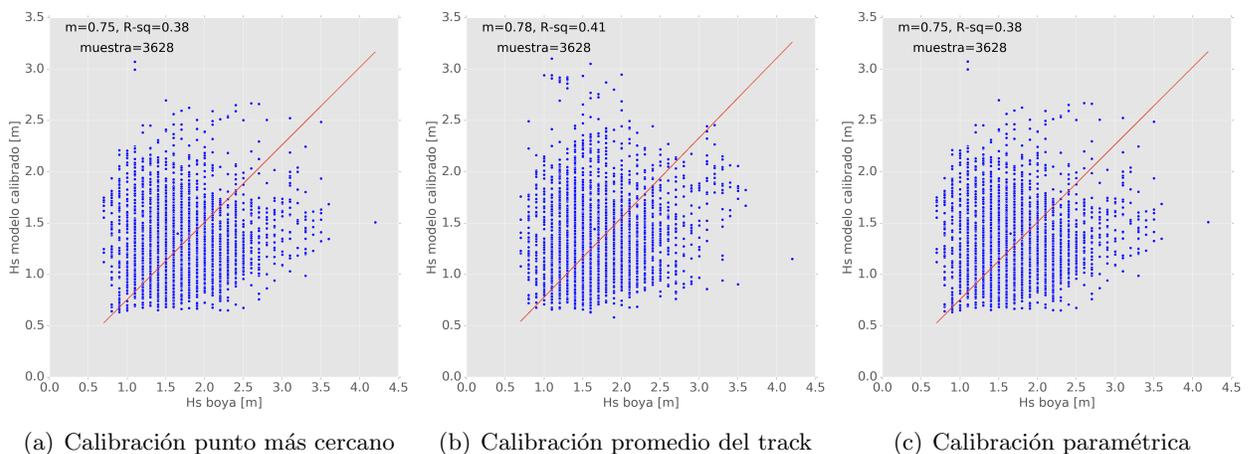


Figura 5.1: Validación climas de oleaje, Iquique.

Los resultados obtenidos mediante las tres metodologías son similares. La metodología de calibración con el promedio del track, se destaca con respecto a las otras ya que la pendiente y el R^2 obtenidos, son más cercanos a la unidad.

²⁶<http://axystechnologies.com/products/triaxys-directional-wave-buoy/>

5.2. Validación del clima de oleaje de Valparaíso

En la Tabla 5.2 se muestran las coordenadas de la boya y del nodo de aguas profundas de Valparaíso. Ambos puntos se encuentran a 120 km aproximadamente.

Tabla 5.2: Ubicación boya Valparaíso.

	lon [°]	lat [°]	Profundidad estimada [m]
Nodo aguas profundas	-73,0	-33,0	4.770
Boya Triaxys	-71,689	-32,908	150

Las series comparadas fueron generados con una ventana espacial de $0,5^\circ$; y temporal, de 0,5 horas. A continuación se muestran las regresiones lineales obtenidas (ver Fig. 5.2).

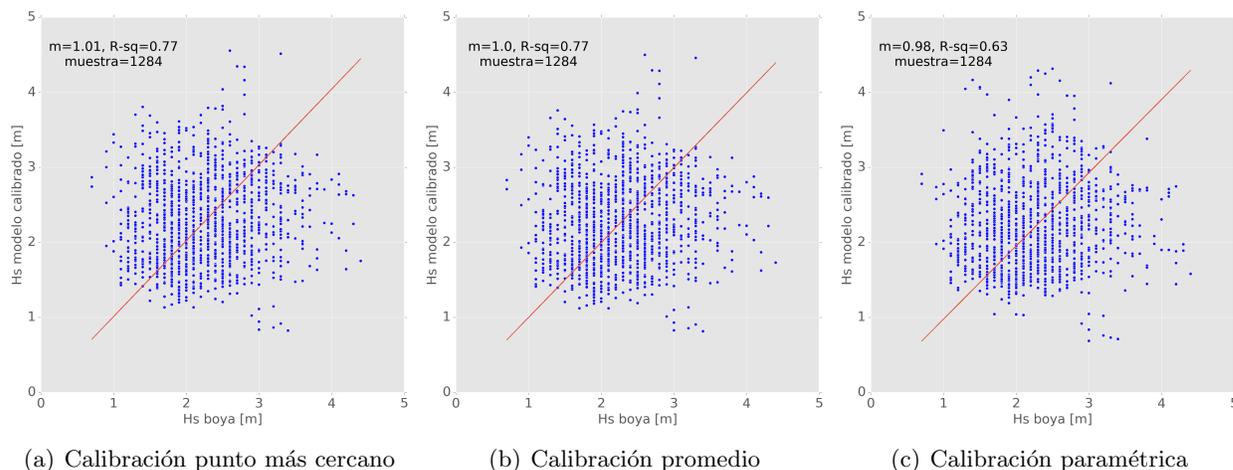


Figura 5.2: Validación climas de oleaje, Valparaíso.

Los resultados obtenidos mediante las tres metodologías son similares. Para este nodo en particular, la calibración paramétrica presenta la pendiente con mayor diferencia a uno y el menor coeficiente de determinación.

En las Figuras 5.1 y 5.2 se aprecia que la altura de ola medida por la boya es discreta. Los datos no fueron manipulados, se usaron tal como fueron recibidos. Mirando con mayor detenimiento las figuras antes mencionadas, se ve que se registran alturas cada 10 cm aproximadamente, lo que puede corresponder a la resolución máxima del instrumento.

Los valores de R^2 obtenidos son mayores de lo que sugiere la gran dispersión que se aprecia visualmente en los gráficos. Realizando un análisis similar al mostrado en la Figura 4.9, se obtuvo que la mayoría de los puntos se distribuyen cerca del ajuste central, lo que justifica los coeficientes de determinación obtenidos.

6. Implementación de calibraciones en proyectos de ingeniería

En el presente capítulo se implementan las 3 metodologías de calibración en diferentes proyectos de ingeniería previamente desarrollados por PRDW, y se analiza el valor del rango de resultados obtenidos con la familia de climas de oleaje.

6.1. Extensión rompeolas, puerto de Arica

El proyecto se ubica en el Terminal Puerto Arica, región de Arica y Parinacota, Chile. La extensión del rompeolas se debe a que se está estudiando ampliar dos sitios de atraque del puerto. El proyecto se encuentra en etapa de ingeniería conceptual.

Los elementos de coraza a usar en el rompeolas corresponden a Dolos²⁷. A grandes rasgos, el cálculo del tamaño de estos elementos depende solo de la altura de ola.

Para encontrar la altura de diseño se debe propagar el oleaje desde el nodo de aguas profundas hacia aguas someras. El clima de oleaje utilizado en esta aplicación fue obtenido adoptando una ventana espacial de $0,5^\circ$ y una ventana temporal de 0,5 hr. La familia de climas fue generada a partir de los intervalos de confianza de la pendiente del ajuste lineal. La calibración del clima modelado se realizó utilizando la metodología de calibración con el dato promedio de cada track.

Una vez realizada la propagación, se debe realizar un análisis de valores extremos (EVA) para encontrar la altura de ola asociada a un periodo de retorno de 100 años. Se debe definir un umbral de tormenta para encontrar todas los eventos extremos de la serie, el que se definió en 3 metros. Además, cabe señalar que se consideró que las tormentas tienen una duración mínima de 24 horas, por lo que al día se podrá seleccionar máximo un evento extremo. En la Figura 6.1 se muestra una imagen con el clima de oleaje de aguas someras y las tormentas seleccionadas.

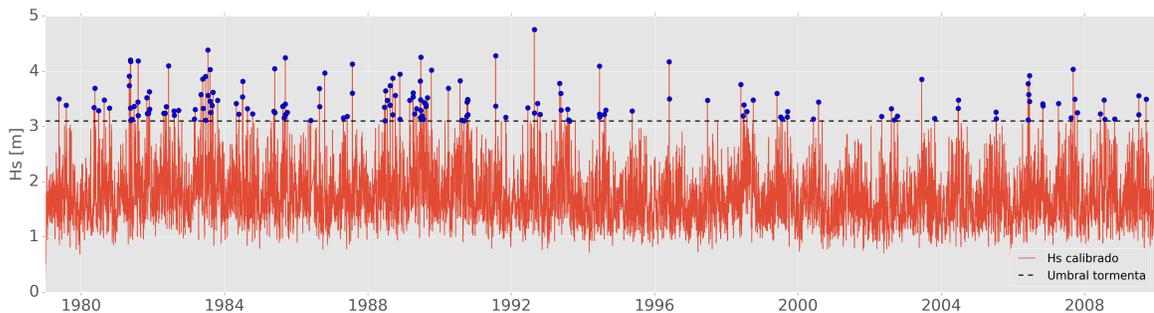


Figura 6.1: Valores pico sobre umbral de tormenta, Arica.

Finalmente, se debe ajustar una distribución de probabilidades a los eventos extremos seleccionados (ver Figura 6.2), con la cual se puede proyectar la altura de ola con 100 años de periodo de retorno. Las figuras obtenidas con los climas envolventes se muestran en los anexos.

Una vez obtenido el valor de la ola de 100 años de periodo de retorno, se calcula el tamaño de los elementos de coraza del rompeolas con la ecuación de Burchart y Liu:

$$\frac{Hs}{\Delta D_n} = (17 - 26r)\phi^{2/3} N_{od}^{1/3} N^{-0,1} \quad (6.1)$$

²⁷<https://en.wikipedia.org/wiki/Dolos>

dónde:

H_s : Altura de oleaje.

Δ : Densidad relativa. $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$

ρ_w : Densidad del agua de mar.

ρ_s : Densidad del elemento de protección.

D_{n50} : Longitud equivalente de un cubo de roca.

r : Razón de forma de los dolos.

N_{od} : Número de unidades desplazadas.

N : Número de olas.

ϕ : Densidad de colocación.

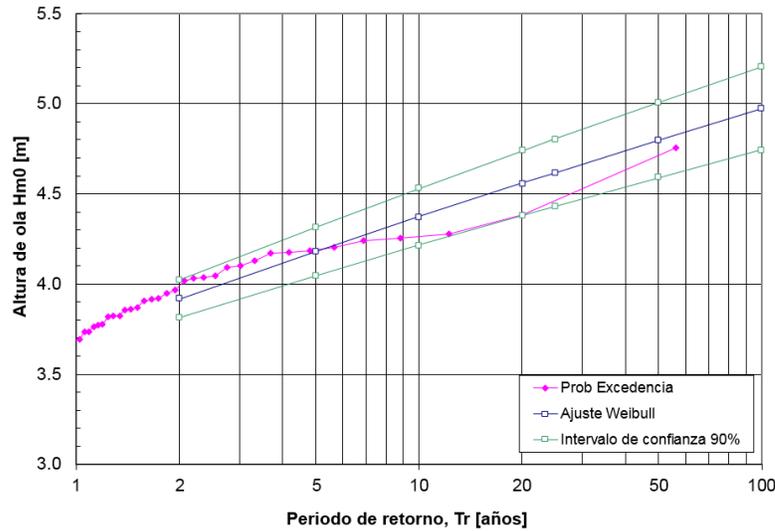


Figura 6.2: Ajuste de Weibull clima central, EVA.

En la Tabla 6.1 se presentan las alturas de ola con periodo de retorno 100 años, el tamaño medio y la masa de la roca obtenidos con los climas superior e inferior de la familia.

Tabla 6.1: Rango de resultados en el diseño de rompeolas, Arica.

	Banda inferior	Banda superior
$Hm_{TR=100}$ [m]	4,95	5,0
D_{n50} [m]	1,4	1,41
W_{50} [ton]	6,52	6,73

El tamaño de los dolos, al ser elementos prefabricados, es fijo (no se entrega un rango de masas aceptadas con en las rocas). Por lo que un rango de resultados puede no ser de utilidad. Adoptando un criterio conservador, se puede considerar la cota superior del intervalo como el tamaño de elementos a utilizar.

6.2. Estudio de barco atracado en Terminal GNL, Quintero

El proyecto se ubica en el puerto de Quintero, V región, y consiste en un terminal de gas natural licuado. Uno de los estudios realizados para el proyecto, corresponde a un modelado de barco atra-

cado para calcular la no disponibilidad de operación de diferentes barcos en el terminal. El proyecto fue construido entre los años 2007 y 2008.

Entre otros alcances, un estudio de barco atracado consiste de manera simplificada, en obtener un set de curvas límite que indican a la máxima altura que puede operar, sin registrarse fallas del sistema de amarre, un barco en el terminal, para una combinación de dirección y periodo.

En la Figura 6.3 se pueden apreciar las curvas límite obtenidas para un barco LNG Carrier de $125.000 m^3$ de capacidad.

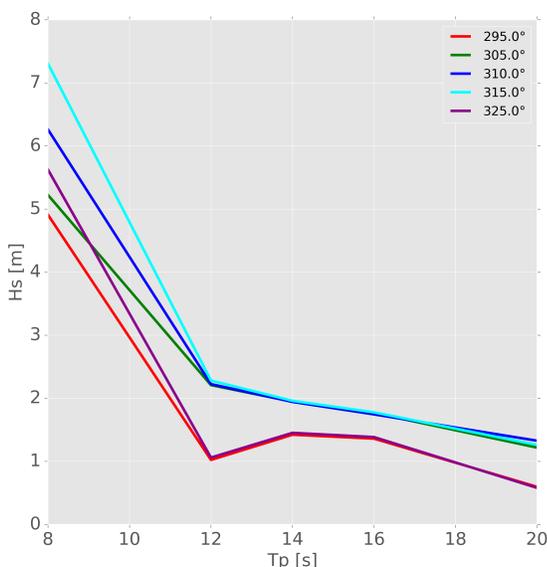


Figura 6.3: Curva límite operación.

Para realizar el análisis de los movimiento del barco, se debe propagar el clima de oleaje desde aguas profundas hacia el terminal.

Debido a limitaciones de tiempo es impracticable modelar el total de combinaciones de periodo, dirección y altura; por lo que se simulan los casos más representativos. Dado lo anterior, se debe interpolar linealmente para poder comparar los casos donde la dirección y periodo del estado de mar no se encuentran modelados.

Se debe comparar cada altura propagada con la obtenida a partir de las curvas límite. En caso de que esta última, sea mayor que el caso límite, se registrará una falla. Finalmente se debe contar el número de estados de mar donde ocurre una falla para calcular el porcentaje de no disponibilidad.

En esta aplicación se utilizó el clima de oleaje generado a partir de una ventana espacial de $0,5^\circ$ y una temporal, de 0,5 horas. La familia de climas de oleaje se obtuvo con el método de los intervalos de confianza y se utilizó la metodología de calibración contra el punto más cercano. En la Tabla ?? se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 6.2: Rango de resultados en no disponibilidad de barco atracado, Mejillones.

	Banda inferior	Banda superior
No disponibilidad [%]	1,18	1,39

Se comprobó el funcionamiento de la metodología utilizando el mismo clima de oleaje que se utilizó en el proyecto original. Los resultados obtenidos difieren en cerca del 1%, por lo que se comprobó su buen funcionamiento.

6.3. Cálculo del potencial de oleaje, Puerto de San Antonio

Esta aplicación no corresponde a un proyecto de ingeniería desarrollado por PRDW, simplemente se evalúan las condiciones de potencial de oleaje en la boca del puerto de San Antonio, en la región de Valparaíso.

El potencial de oleaje se calcula con la ecuación que se muestra a continuación:

$$P = \frac{1}{8} \frac{d}{L} \rho_w g^2 H_s^2 T_E \quad (6.2)$$

dónde:

H_s : Altura de oleaje.

d : profundidad.

ρ_w : Densidad del agua de mar.

T_E : Periodo energético. $T_E \approx 0,8T_p$

L : Largo de ola.

g : Aceleración de gravedad.

Para calcular el largo de ola se utilizó la simplificación propuesta por Hunt en el año 1979.

$$G = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \frac{d}{g} \quad (6.3)$$

$$F = G + \frac{1}{1 + 0,6522G + 0,4622G^2 + 0,0864G^4 + 0,0675G^5} \quad (6.4)$$

$$L = T \sqrt{\frac{gd}{F}} \quad (6.5)$$

La metodología que se debe seguir para estimar el potencial de oleaje comienza con propagar el clima de oleaje hacia la costa, y luego aplicar las fórmulas anteriores.

El oleaje que se utilizó en esta aplicación se calibró con la metodología paramétrica, con ventanas espaciales y temporales de $0,5^\circ$ y 0,5 hrs respectivamente. La familia de ajustes se generó con el método de regresión por cuantiles.

El punto donde se calculó el potencial de oleaje, en la boca puerto de San Antonio, está a una profundidad de 60 m aproximadamente. En la Figura 6.4 se muestra el promedio anual del potencial de oleaje para los 30 años de oleaje calibrado, y además la media mensual del año 2009.

En la Tabla 6.3 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 6.3: Potencial de oleaje, puerto de San Antonio.

	Banda inferior	Banda superior
Potencia máxima serie histórica [MW/m]	2,35	2,64
Potencia promedio serie histórica [kW/m]	46,314	51,663

Vale la pena mencionar que el máximo mostrado en la tabla anterior, se registró en el invierno del año 1992; el cual corresponde a un año dónde ocurrió el fenómeno meteorológico de El Niño.

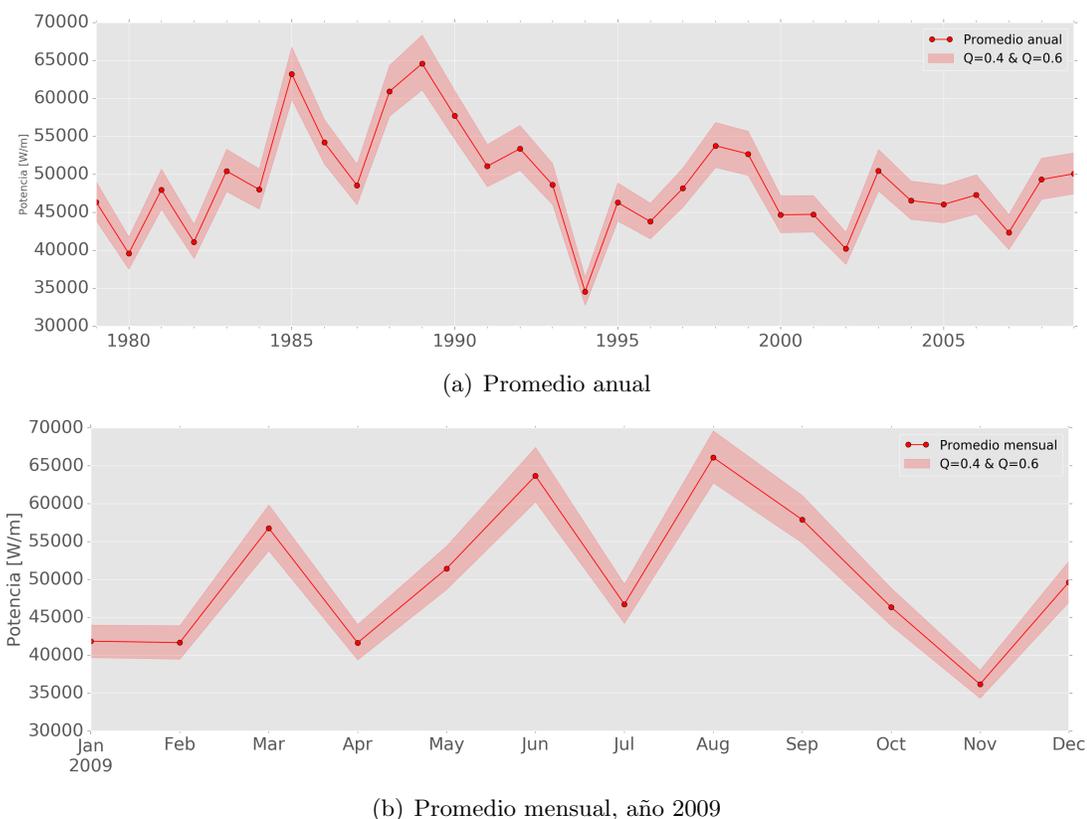


Figura 6.4: Potencial de oleaje, puerto de San Antonio.

En las figuras se puede observar una mayor variación en los resultados, lo que se debe a que el rango entregado por la regresión por cuantiles es más amplio que el obtenido mediante el intervalo de confianza.

Cruz et al. (2009) corresponde a un estudio encargado por el Banco Interamericano de Desarrollo a la firma Garrad Hassan y Asociados, para realizar una selección preliminar de sitios para la instalación de energía marina. En particular, para energía de las olas, se seleccionaron las bahías de Puerto Ventanas, Puerto San Antonio, Puerto San Vicente, Puerto de Coronel, Puerto de Corral, y Puerto Montt.

La elección del Puerto de San Antonio en esta investigación fue para poder comparar los resultados con los que se obtuvo en el trabajo recién mencionado.

Los autores entregan un promedio de 44 [kW/m] para el total del clima de oleaje, pero no se hace mención a la posible variación de este valor, ni a la extensión del clima de oleaje utilizado.

La variación encontrada mediante el método de la regresión por cuantiles resta incertidumbre al resultado, y además se puede comprobar que es menor; este corresponde a aproximadamente un 11 % del promedio de la serie histórica.

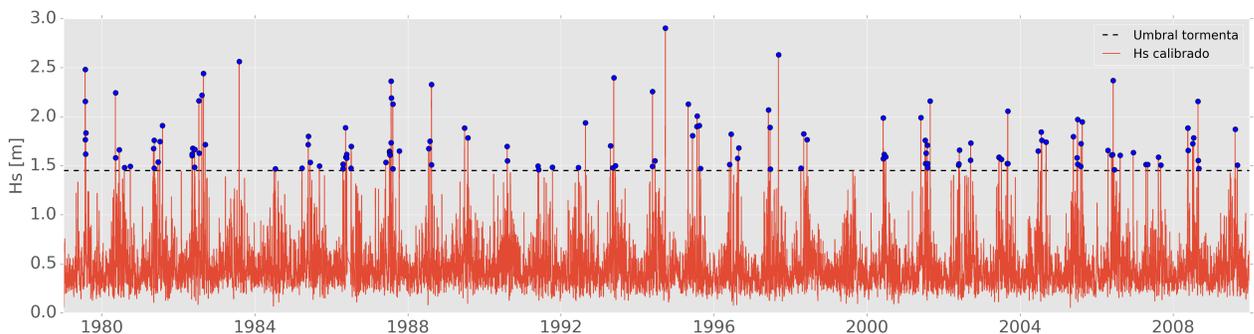
6.4. Esfuerzos sobre pilotes en muelle de descarga de carbón, Coronel

La aplicación consiste en el cálculo de las cargas hidrodinámicas debidas al oleaje sobre el muelle de descarga de carbón de la central termoeléctrica Santa María, ubicada en la bahía de Coronel, VIII región. El proyecto ya fue construido, y opera desde el año 2009.

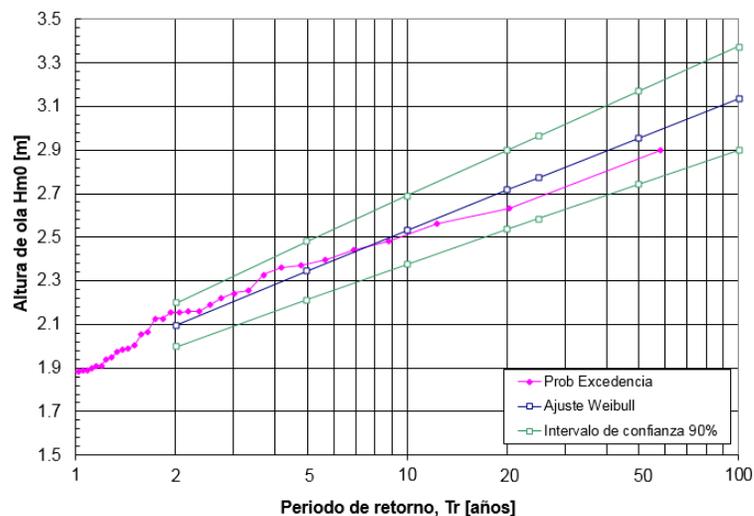
El muelle tiene una longitud total de 1200 m. Los primeros 220 m (de tierra a mar) no fueron evaluados en el presente trabajo. Se calcularon las cargas en el segundo tramo, denominado de luces largas (640 metros), y en el cabezo del muelle. Los pilotes se disponen cada dos metros (en profundidad), desde el veril -18 hacia el -2; todos serán de radio 90 centímetros.

Se propagó el clima de oleaje desde aguas profundas hacia el cabezo del muelle. El clima de oleaje se generó utilizando la metodología del dato promedio, con una ventana espacial de 1° de radio y 30 minutos como ventana temporal. La familia de climas fue elaborada mediante el método de la regresión por cuantiles.

Luego de conocer el clima de oleaje en el cabezo del muelle, se realizó un análisis de valores extremos (EVA) para encontrar la ola con periodo de retorno de 100 años. En desarrollo es análogo al explicado en la sección 6.1. A continuación se muestran los gráficos obtenidos.



(a) Valores pico sobre umbral, Coronel



(b) Ajuste de Weibull, Coronel

Figura 6.5: Cálculo oleaje extremo, Coronel.

Las figuras de los climas de oleaje envolventes se adjuntan en los anexos.

En la Tabla 6.4 se muestra el oleaje extremo incidente sobre en el cabezo del muelle.

Tabla 6.4: Oleaje extremo, Coronel.

	Banda inferior	Banda superior
$Hm_{OR=100}[m]$	3,05	3,23

El siguiente paso consiste en propagar el oleaje hacia cada pilote, ya que se debe encontrar la ubicación de la zona de rotura. Los coeficientes de agitación fueron extraídos de la memoria de cálculo del proyecto. La zona de rompiente se encuentra intersectando el perfil de ola calculado mediante la fórmula de Goda (Hallowell et al., 2016) con el perfil asomerado. Lo anterior se puede ver en la Figura 6.6.

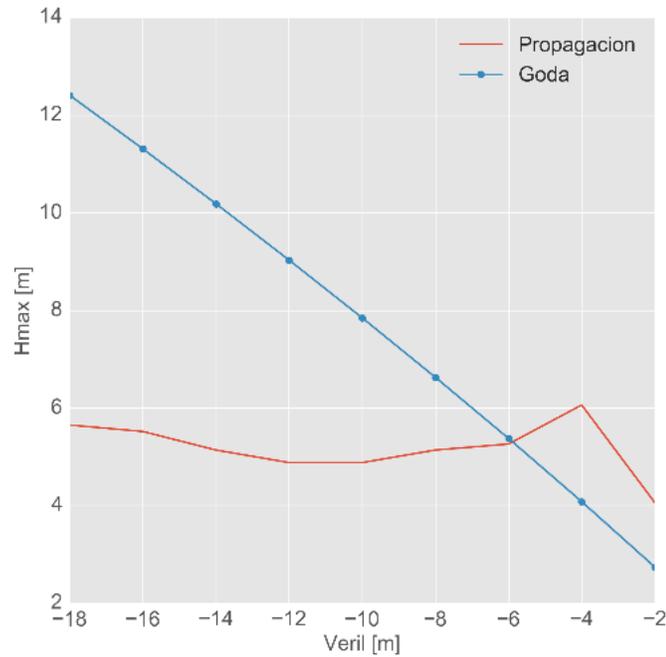


Figura 6.6: Perfil de ola.

Para las condiciones de diseño, a zona de rompiente se inicia entre los veriles -6 y -4, aproximadamente. Se considerará que las olas se rompen desde la cota -4 hacia aguas someras.

Conocida la altura de ola en cada pilote, las cargas hidrodinámicas debidas al oleaje se calculan a partir de la fórmula de Morison.

$$F = F_i + F_d = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} + c_d \frac{1}{2} \rho D u |u| \quad (6.6)$$

dónde:

F : Fuerza sobre un elemento cilíndrico.

F_i : Fuerza de inercia.

F_d : Fuerza de arrastre.

C_m : Coeficiente de inercia

ρ : Densidad del agua de mar.

D : Diámetro exterior del elemento.

du/dt : Aceleración orbital de las partículas de agua dentro de la ola.

C_d : Coeficiente de arrastre.

u : Velocidad orbital de las partículas de agua dentro de la ola.

Los coeficientes C_m y C_d fueron extraídos de la memoria de cálculo del proyecto.

A continuación se muestra un gráfico con la distribución de esfuerzos a la que está sometido el pilote ubicado en el veril -6 (Fig 6.7).

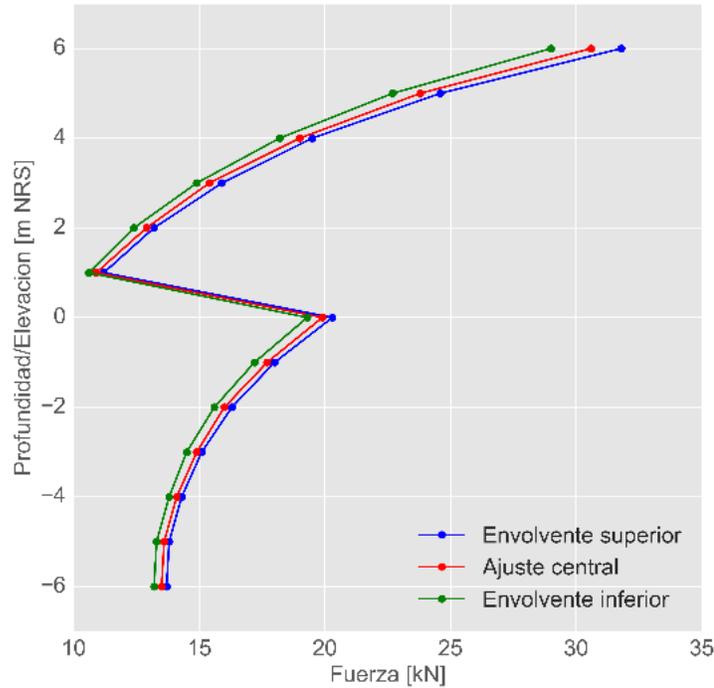


Figura 6.7: Esfuerzo sobre pilote ubicado en veril -6.

Es directo apreciar que para menores alturas de ola, la carga a la que será sometido el pilote es menor. El quiebre en la curva de distribución de fuerza horizontal se debe al crecimiento marino desde la superficie libre del mar hacia el fondo. El crecimiento de biota marina en los pilotes aumenta la rugosidad, y disminuye la fuerza a la que éstos están sometidos. Fijando la elevación en un valor, la fuerza que se ejerce sobre el pilote sería mayor sin crecimiento marino.

En la Tabla 6.5 se presenta el rango de la fuerza a la que está sometido cada pilote del muelle.

Tabla 6.5: Esfuerzo sobre pilotes, muelle de carbón Coronel.

Veril [m]	Banda superior [kN]	Banda inferior [kN]
-18	76	69,6
-16	76,7	68,3
-14	70,8	63,2
-12	68,4	61,3
-10	72,2	65,5
-8	87	73,2
-6	227,7	214,6
-4	138	138
-2	68,8	68,8

Los resultados en los veriles -4 y -2 son idénticos, ya que se está en condición de rompiente, por lo que la altura de ola no depende del clima de aguas profundas. El aumento de la fuerza ejercida sobre la estructura entre los veriles -8 y -4 se debe a que en esa zona las olas rompen. El intervalo de resultados es acotado, por lo que éste puede no ser relevante frente al factor de seguridad que se adoptó en el diseño de los pilotes.

7. Comentarios y conclusiones

- Se elaboró una serie de metodologías de calibración de oleaje de aguas profundas mediante mediciones efectuadas por satélites. Las herramientas propuestas se diferencian en la manera de asociar los registros con los datos modelados, ya que es necesario establecer una serie de criterios espaciales y temporales para determinar si un par de datos (medido por satélite y simulado mediante un modelo global de oleaje) es apto para la calibración.
- La metodología de calibración paramétrica entrega la opción de sensibilizar el análisis según criterios de altura, dirección y periodo. Corresponde una variación de la herramienta que utiliza el dato promedio del track, en el sentido de que se realizan no una, si no que una serie de regresiones lineales al final del proceso. Este método responde las interrogantes planteadas en los objetivos específicos del trabajo, ya que es factible verificar si el oleaje de tormenta u operación, *swell* o *sea*, y proveniente de diferentes direcciones responden o no a un mismo ajuste lineal o no. Se concluye que para diferentes combinaciones de estos tres parámetros, los resultados obtenidos con el modelo de mínimos cuadrados (pendiente y coeficiente de determinación) son diferentes. En cierto modo, el resultado era esperable, ya que la regresión lineal es sensible al tamaño de la muestra; por lo que se presenta un sesgo en las combinaciones que resultan usuales en las costas de nuestro país.
- Con la información disponible hoy en día, no es posible realizar una calibración satisfactoria del periodo y dirección de propagación de las olas. El modelo “Two piece model” fue desarrollado por investigadores pertenecientes a centros británicos, y utilizando registros de oleaje del hemisferio norte, por lo que se encuentra calibrado para esa parte del mundo. Se determinó que los modelos existentes para calcular el periodo a partir de información altimétrica no son aplicables al oleaje de las costas de Chile, ya que subestiman el periodo pico.
- No es posible determinar si una metodología de calibración es mejor que otra. Esto debe ser analizado caso a caso, debido que los resultados obtenidos no permitieron concluir al respecto. Se recomienda calibrar con las tres herramientas y tomar la decisión de qué clima utilizar observando los resultados, y en función de la utilización que se vaya a dar a la información

obtenida, pudiendo adoptar criterios conservadores o de tendencia central. Tampoco fue posible determinar si los ajustes lineales resultaron mejor en las ventanas de menor radio, ya que por ejemplo en Coronel, el R^2 más alto se obtuvo con el dominio espacial de un grado. Es importante tener en cuenta que el tamaño de la muestra juega un papel clave, ya que no existe una regla sobre la cantidad de datos necesarios para calibrar una serie de tiempo de una extensión en particular. Se debe realizar un análisis de alternativas frente al valor del coeficiente de determinación y la cantidad de datos, puesto que es necesario alcanzar un compromiso entre estas variables. Se recomienda considerar antes el coeficiente R^2 , pero finalmente será decisión del usuario.

- Inicialmente se planteó el objetivo de realizar un análisis más sofisticado y robusto que el que se realiza actualmente por las firmas que venden climas de aguas profundas calibrados. Dos de las metodologías, *a priori*, se diferencian en muy poco de la que se considera estándar. Se debe recalcar que el criterio con que se generan los pares de datos es determinante, ya que si se privilegia el criterio temporal antes que el espacial, los resultados serán completamente diferentes. Lo anterior, fue el primer camino seguido en este trabajo, y se obtuvo valores de R^2 menores a 0,2. Vale la pena mencionar que se consideraron satisfactorios los ajustes con valores de R^2 mayores a 0,6. Finalmente, si bien es cierto que las metodologías propuestas no se diferencian de gran manera a las existentes, se logró transparentar el proceso y determinar que aspectos son más relevantes que otros para lograr calibraciones precisas y confiables.
- Gracias a los datos adquiridos del SHOA fue posible comparar los climas calibrados, y luego calibrados, propagados con mediciones de boyas. Los resultados obtenidos no fueron los esperados; en Iquique se estimó que el oleaje medido por la boya TRIAXYS es cerca de un 20% mayor que el calibrado. Por otro lado, en Valparaíso, las olas comparadas no presentan diferencias significativas. Las discrepancias observadas con los datos del SHOA puede ser en parte atribuida a la precisión de los modelos globales de oleaje, a los datos satelitales o al error instrumental de las boyas. Las lecturas de éstas últimas deben ser corregidas dependiendo si se tienen *swells* o *seas*. Evaluar con precisión las fuentes de error de ambos registros es complejo. Se requeriría investigar datos acerca de la calibración de la boya contra sensores fijos confiables y validación de mediciones de larga data, lo que escapa de los alcances del estudio. Otra posible causante de las diferencias, es que el modelo de propagación de oleaje utilizado no involucra generación de oleaje por vientos locales y no discrimina si los estados de mar son unimodales. La boya mide oleaje proveniente de diferentes direcciones en todo el rango de frecuencias, y el clima propagado presenta solo estados de mar compuestos de un frente.
- Con respecto a la aplicación de las familias de climas de oleaje calibrados en proyectos de ingeniería previamente desarrollados por PRDW, se concluye que la mayoría de los rangos de resultados no son de mayor utilidad debido a lo acotado que son. Si bien, lo anterior resta valor a la implementación de familias de oleaje, esto puede deberse al extenso y minucioso proceso de filtrado que se aplicó a los datos. Además, se puede concluir que la poca variabilidad de los resultados frente al intervalo de confianza de la pendiente y a la regresión por cuantiles, es debido a la validez y consistencia de la información. En el otro extremo, si la variabilidad fuera alta, la calidad de ésta podría ser cuestionable.
- Debido a la alta dependencia de los modelos utilizados en ingeniería de costas frente al clima de oleaje utilizado, fue imposible determinar el efecto de las metodologías de calibración en el diseño de estructuras expuestas al oleaje y en aspectos relativos a oleaje operacional. En la aplicación realizada en Quintero, se obtuvo una variación significativa en los resultados según el clima de oleaje utilizado en el desarrollo del proyecto y en la evaluación hecha en el marco de este trabajo. Lo ideal habría sido contar con un proyecto desarrollado utilizando un

clima de oleaje modelado de la base NCEP, calibrado de una manera distinta. Así se podría haber comprobado el efecto de usar las metodologías de calibración propuestas. El efecto de las herramientas presentadas, en aspectos ingenieriles, apunta al uso de familias de climas de oleaje. Se recomienda adoptar parámetros más holgados. Por ejemplo, definir un intervalo de confianza con una probabilidad del 99 % o mayor, o cuantiles más extremos que 0,6 y 0,4. Lo anterior repercutirá en que el rango de resultados obtenidos sea más amplio.

- El trabajo da pie para investigaciones futuras en los siguientes ámbitos: (1) modificar la rutina de extracción de datos satelitales para que reconozca la latitud en la que se está trabajando. En altas latitudes las ventanas deberían ser elípticas, y no circulares (al representarlas en coordenadas geográficas). En Python existen herramientas para realizar lo anterior, pero no fue necesario aplicarlas debido a la ubicación de las bahías estudiadas. (2) Adquirir más información de boyas de aguas profundas, en el SHOA o en la NOAA, y generar un modelo similar al presentado en Mackay et al. (2008) con el cual se pueda modelar el periodo de las olas en las costas del Pacífico Sur. (3) Desarrollar una rutina de programación que sea capaz de determinar si los espectros medidos con radares de apertura sintética son consistentes. Como se mencionó en la sección 3.3.2, es necesario realizar una inspección gráfica a los datos, a pesar de que presenten calidad máxima. En este estudio se contaban con cerca de 300 espectros por bahía, por lo que resultó imposible revisar visualmente si presentaban alguna inconsistencia. (4) Finalmente, como la información modelada se encuentra desagregada por frentes, podría ser de utilidad componer espectros sintéticos. Además, se podría generar una calibración de estos utilizando los espectros medidos por satélite resultantes de la rutina que se describió en el punto anterior.

8. Bibliografía

- Abdalla, S., Bidlot, J.-R., and Janssen, P. (2006). Global validation and assimilation of envisat asar wave mode spectra. *Proc. of SEASAR*, pages 8–1.
- Acuña, G. (2011). Tópicos de geodesia geométrica.
- Baird (2015). Proyecto olas chile versión 5.
- Barrick, D. E. (1968). Rough surface scattering based on the specular point theory. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 16(4):449–454.
- Bauer, E., Hasselmann, S., Hasselmann, K., and Graber, H. C. (1992). Validation and assimilation of seasat altimeter wave heights using the wam wave model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C8):12671–12682.
- Bendat, J. S. and Piersol, A. G. (2011). *Random data: analysis and measurement procedures*, volume 729. John Wiley & Sons.
- Booij, N., Ris, R., and Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4):7649–7666.
- Bosch, W. (2003). Geodetic application of satellite altimetry. In *Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography*, pages 3–21. Springer.
- Cade, B. S. and Noon, B. R. (2003). A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(8):412–420.
- Caires, S., Sterl, A., and Gommenginger, C. (2005). Global ocean mean wave period data: Validation and description. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C2).
- Cavaleri, L., Alves, J.-H., Ardhuin, F., Babanin, A., Banner, M., Belibassakis, K., Benoit, M., Donelan, M., Groeneweg, J., Herbers, T., et al. (2007). Wave modelling—the state of the art. *Progress in oceanography*, 75(4):603–674.
- Challenor, P. and Cotton, P. (2002). The joint calibration of altimeter and in situ wave heights. *Advances in the applications of marine climatology-the dynamic part of the WMO guide to the applications of marine climatology. WMO/TD*, (1081).
- Chu, P. C., Qi, Y., Chen, Y., Shi, P., and Mao, Q. (2004). South china sea wind-wave characteristics. part i: validation of wavewatch-iii using topex/poseidon data. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 21(11):1718–1733.
- Contreras, M., Alday, M., Ceballos, J., and Erazo, T. (2015). Variación espacial y temporal en el oleaje del mar de bellingshausen. In *Anales del Instituto de la Patagonia*, volume 43, pages 137–144.
- Cox, A. T., Cardone, V. J., and Swail, V. R. (1999). On the use of in situ and satellite wave measurements for evaluation of wave hindcasts. In *Proc. WMO Workshop on Advances in Marine Climatology (CLIMAR99)*, pages 8–15.
- Cruz, J., Thomson, M., Stavroulia, E., and Rawlinson-Smith, R. (2009). Preliminary site selection—chilean marine energy resources. *Garrad Hassan*.
- Cushman-Roisin, B. and Beckers, J.-M. (2011). *Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects*, volume 101. Academic Press.

- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*.
- Eldeberky, Y. and Battjes, J. (1994). Nonlinear coupling in waves propagating over a bar. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(24).
- Fournier, C., Pantoja, C., Resio, D., and Scott, D. (2004). *The Development of a 40 Year Wave Climate for the Entire Chilean Coastline*. ASCE.
- Fu, L.-L. and Cazenave, A. (2000). *Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications*, volume 69. Academic Press.
- Geernaert, G. L. and Plant, W. J. (2013a). *Surface Waves and Fluxes: Volume I?Current Fluxes*, volume 8. Springer Science & Business Media.
- Geernaert, G. L. and Plant, W. J. (2013b). *Surface Waves and Fluxes: Volume II?Remote Sensing*, volume 8. Springer Science & Business Media.
- Gommenginger, C., Srokosz, M., Challenor, P., and Cotton, P. (2003). Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model. *Geophysical Research Letters*, 30(22).
- Group, T. W. (1988). The wam model-a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12):1775–1810.
- Hallowell, S., Myers, A., and Arwade, S. (2016). Variability of breaking wave characteristics and impact loads on offshore wind turbines supported by monopiles. *Wind Energy*, 19(2):301–312.
- Hofer, R. and Njoku, E. G. (1981). Regression techniques for oceanographic parameter retrieval using space-borne microwave radiometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, (4):178–189.
- Holthuijsen, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press.
- Hunt, J. N. (1979). Direct solution of wave dispersion equation. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 105(4):457–459.
- Hwang, P. A., Teague, W. J., Jacobs, G. A., and Wang, D. W. (1998). A statistical comparison of wind speed, wave height, and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the gulf of mexico region. *Journal of Geophysical Research*, 103(C5):10451–10468.
- Krogstad, H. E. and Barstow, S. F. (1999). Satellite wave measurements for coastal engineering applications. *Coastal Engineering*, 37(3):283–307.
- Lutz, M. (1996). *Programming python*, volume 8. O’Reilly.
- Mackay, E., Retzler, C., Challenor, P., and Gommenginger, C. (2008). A parametric model for ocean wave period from ku band altimeter data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C3).
- Maul, G. A. (2012). *Introduction to satellite oceanography*, volume 3. Springer Science & Business Media.
- Mesa García, J. C. et al. (2010). *Metodología para el reanálisis de series de oleaje para el caribe colombiano*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Miles, J. W. (1981). Korteweg-de vries equation: A historical essay. *Journal of fluid mechanics*, 106(131):4.

- Monaldo, F. (1988). Expected differences between buoy and radar altimeter estimates of wind speed and significant wave height and their implications on buoy-altimeter comparisons. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93(C3):2285–2302.
- Pintado, E. G., García, G. M., and Concha, F. N. (2010). Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las tig. In *La información geográfica al servicio de los ciudadanos [Recurso electrónico]: de lo global a lo local*, pages 861–872. Universidad de Sevilla.
- Queffeuou, P. (2004). Long-term validation of wave height measurements from altimeters. *Marine Geodesy*, 27(3-4):495–510.
- Quilfen, Y., Chapron, B., Collard, F., and Serre, M. (2004). Calibration/validation of an altimeter wave period model and application to topex/poseidon and jason-1 altimeters. *Marine Geodesy*, 27(3-4):535–549.
- Ramírez, R. D. M. and Arias, A. O. (2007). Los modelos de generación de oleaje de viento: Características, evolución y futuras aplicaciones en colombia. *Avances Recursos Hidráulicos*, (15).
- Research, C. I., Association, I., en Regelgeving (Netherlands), C. C. U. R., and d'études maritimes et fluviales (France), C. (2007). *The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering*, volume 683. Ciria.
- Robinson, I. S. (2010). *Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography*. Springer Science & Business Media.
- Schulz-Stellenfleth, J., König, T., and Lehner, S. (2007). An empirical approach for the retrieval of integral ocean wave parameters from synthetic aperture radar data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C3).
- Schulz-Stellenfleth, J., Lehner, S., and Hoja, D. (2005). A parametric scheme for the retrieval of two-dimensional ocean wave spectra from synthetic aperture radar look cross spectra. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C5).
- Sverdrup, H. U. and Munk, W. H. (1946). Empirical and theoretical relations between wind, sea, and swell. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 27(6):823–827.
- Tolman, H. L. et al. (2009). User manual and system documentation of wavewatch iii tm version 3.14. *Technical note, MMAB Contribution*, 276.
- Valenzuela, G. R. (1978). Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves? a review. *Boundary-Layer Meteorology*, 13(1-4):61–85.
- Violante-Carvalho, N., Robinson, I., and Schulz-Stellenfleth, J. (2005). Assessment of ers synthetic aperture radar wave spectra retrieved from the max-planck-institut (mpi) scheme through intercomparisons of 1 year of directional buoy measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C7).
- Walsh, E., Hancock III, D., Hines, D., Swift, R., and Scott, J. (1985). Directional wave spectra measured with the surface contour radar. *Journal of physical oceanography*, 15(5):566–592.
- Walsh, E. J. (1974). Analysis of experimental nrl radar altimeter data. *Radio Science*, 9(8-9):711–722.
- Walsh, E. J., Hancock III, D. W., Hines, D. E., Swift, R. N., and Scott, J. F. (1989). An observation of the directional wave spectrum evolution from shoreline to fully developed. *Journal of physical oceanography*, 19(5):670–690.

Wiegel, R. and Johnson, J. (1951). Elements of wave theory. In *Proc. First Conf. on Coastal Eng.*

Anexos

A. Radio ventana espacial

La Figura A.1 justifica la elección del radio de los dominios espaciales utilizados para seleccionar mediciones satelitales alrededor de los nodos en las cinco bahías estudiadas.

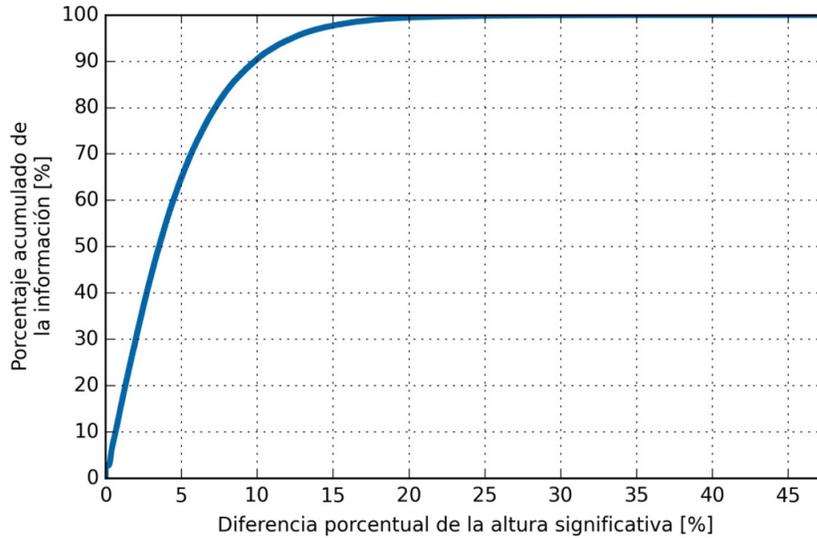


Figura A.1: Justificación ventana espacial.

Fuente: Informe técnico interno PRDW, Calibración de oleaje offshore medido a través de altimetría satelital.

B. Ventana temporal

En la Figura B.1 se puede apreciar el porcentaje acumulado de información en función de la diferencia porcentual de altura significativa para diferentes ventanas temporales. Este gráfico justifica la elección del desfase temporal aceptado para generar pares entre datos satelitales y modelados.

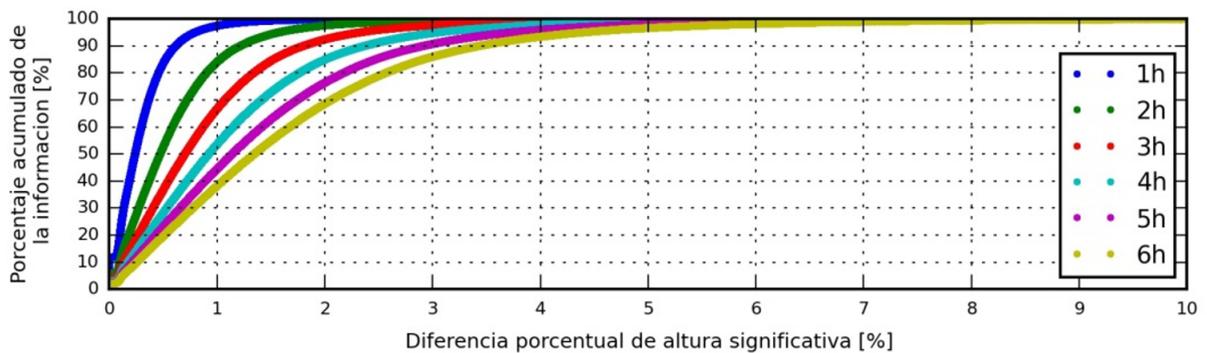


Figura B.1: Justificación ventana temporal.

Fuente: Informe técnico interno PRDW, Calibración de oleaje offshore medido a través de altimetría satelital.

C. Calibración con punto más cercano en el espacio

En las Figuras C.1, C.2 y C.3 se pueden apreciar los gráficos que no fueron incluidos en el cuerpo del informe.

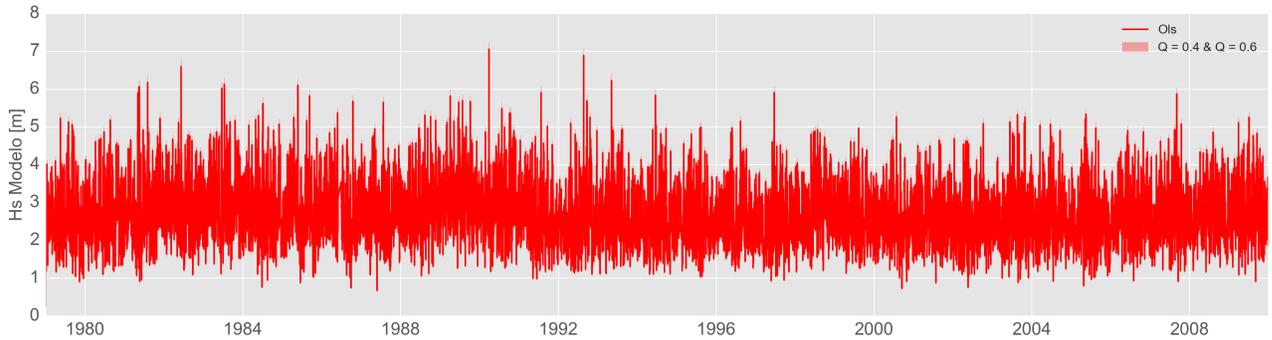


Figura C.1: Familia de ajustes lineales a partir de regresión por cuantiles, metodología PMC.

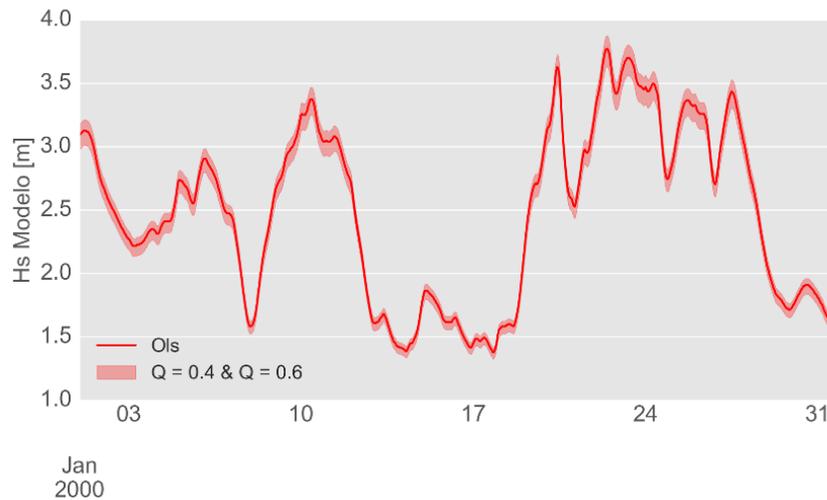


Figura C.2: Familia de ajustes lineales a partir de regresión por cuantiles, febrero del 2000. Metodología PMC.

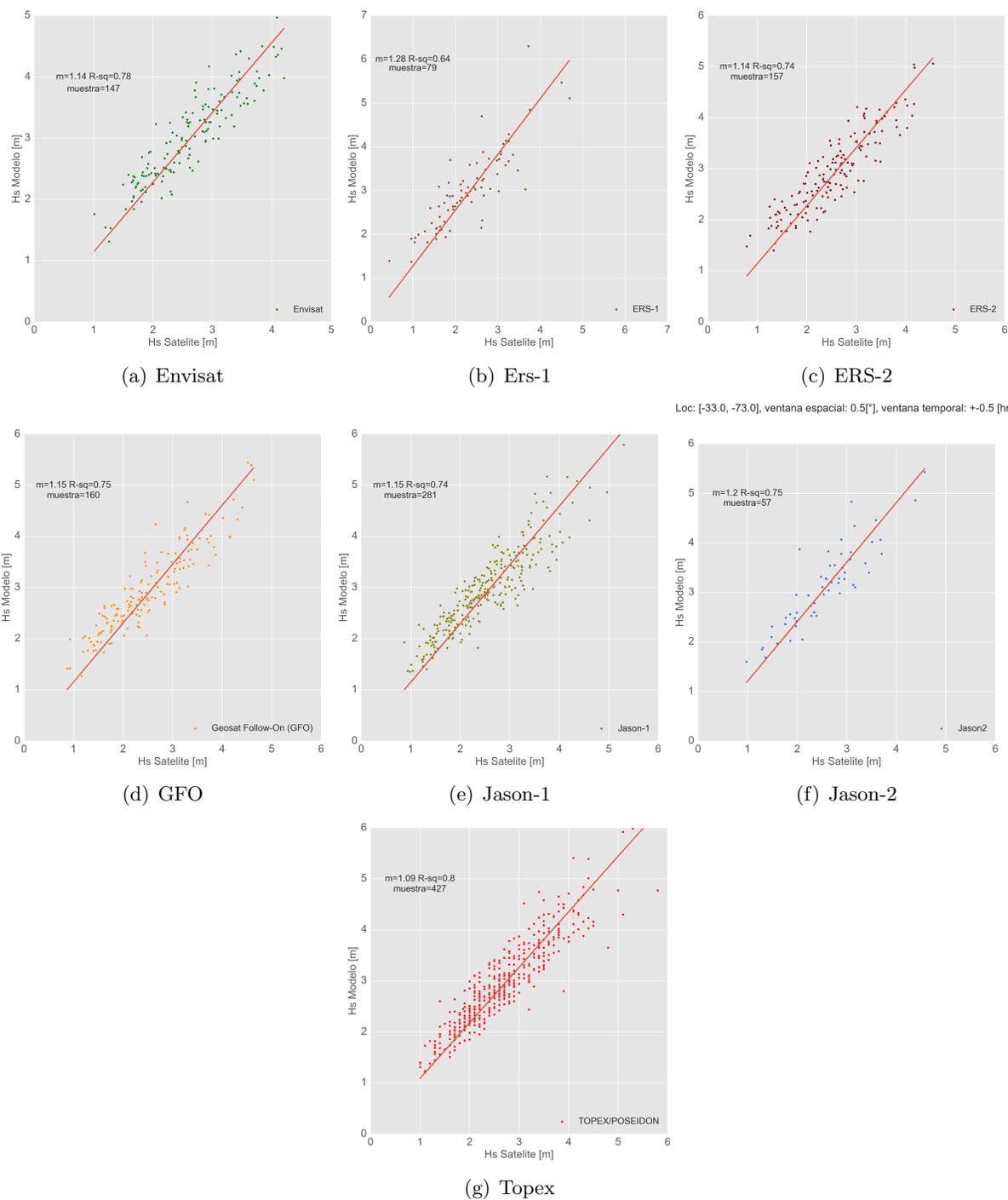


Figura C.3: Ajuste de mínimos cuadrados por satélite, metodología PMC.

Los resultados obtenidos para las demás ventanas espaciales se encuentran disponibles en el repositorio online mencionado en la sección 4.1.1.

D. Calibración con dato promedio del track

En las Figuras D.1, D.2, D.3, D.4, D.5, D.6 y D.7 se muestran los gráficos que no fueron incluidos en el cuerpo del informe.

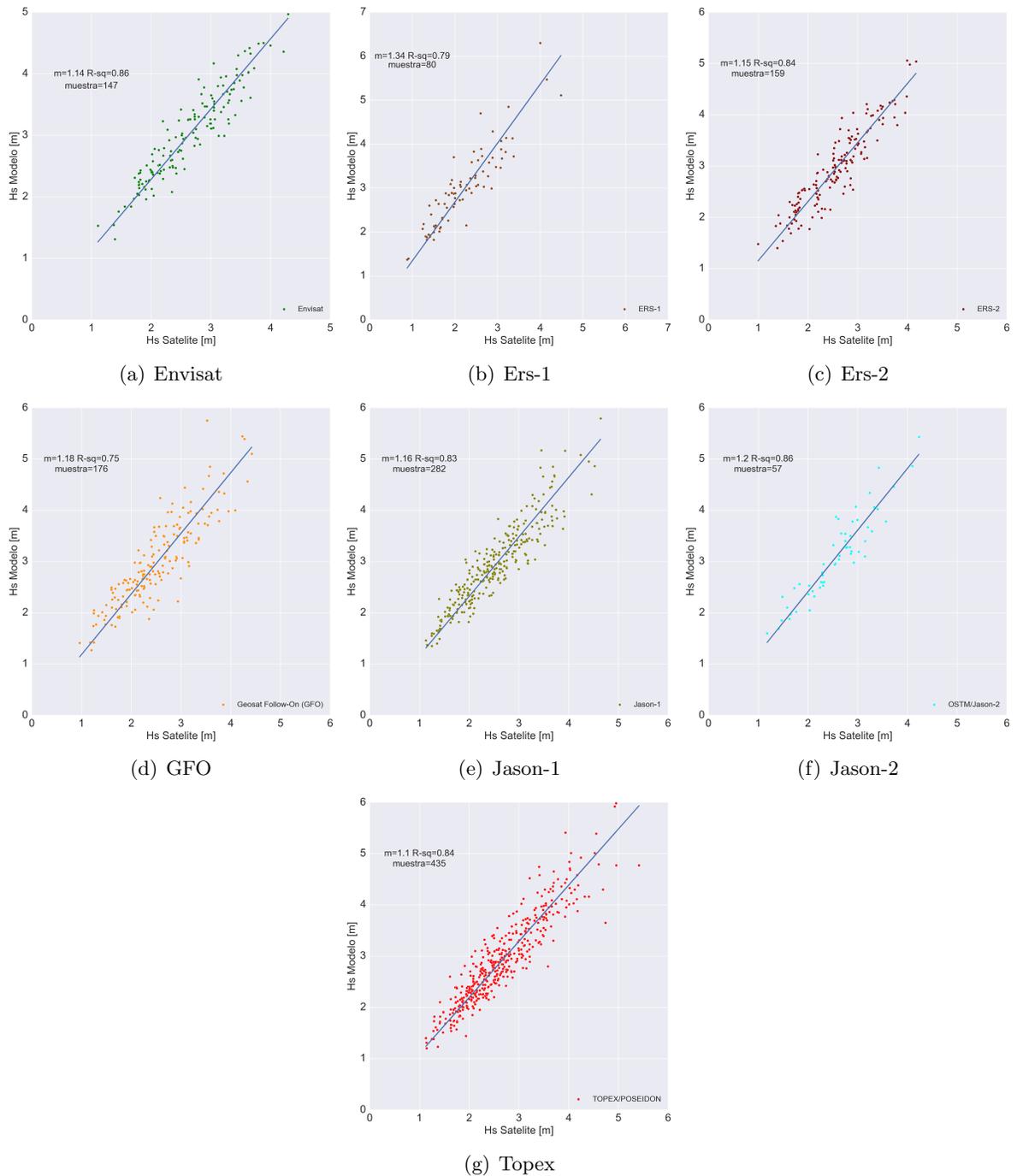
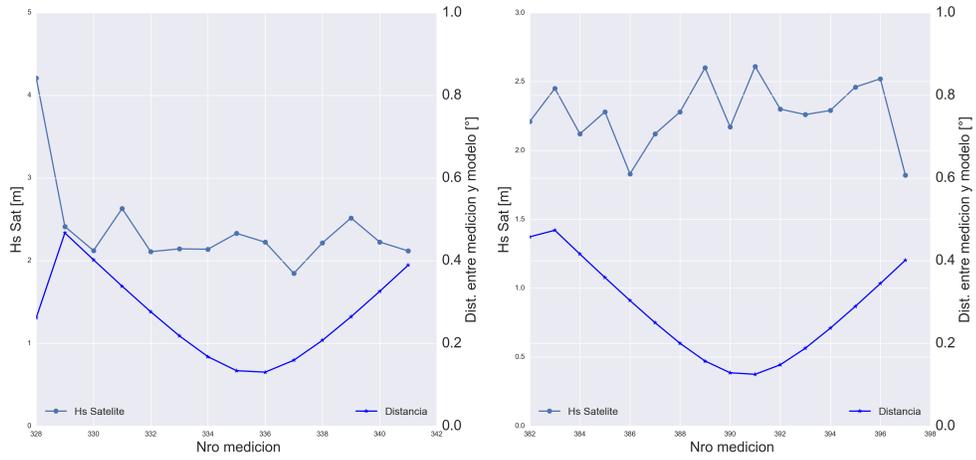
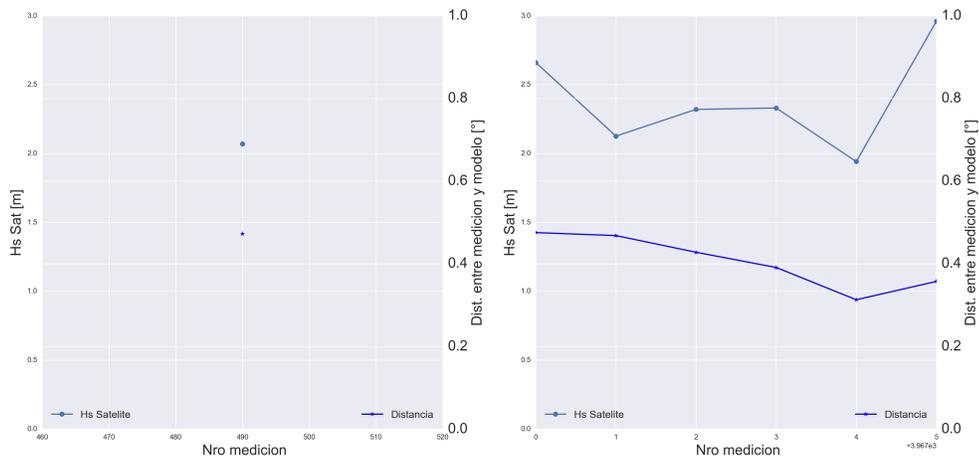


Figura D.1: Ajuste de mínimos cuadrados por satélite, Metodología PMC.



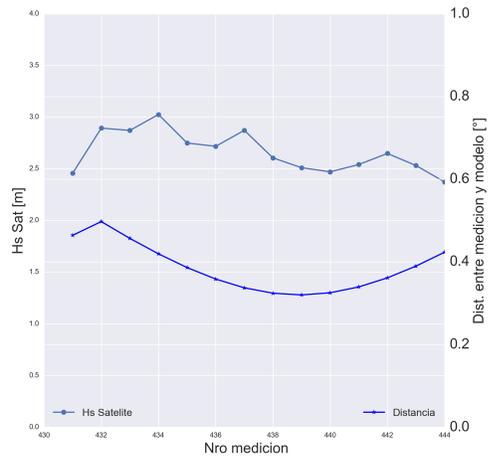
(a) Envisat

(b) Ers-1



(c) GFO

(d) Jason-1



(e) Jason-2

Figura D.2: Variación altura significativa dentro del track.
Fuente: Elaboración propia

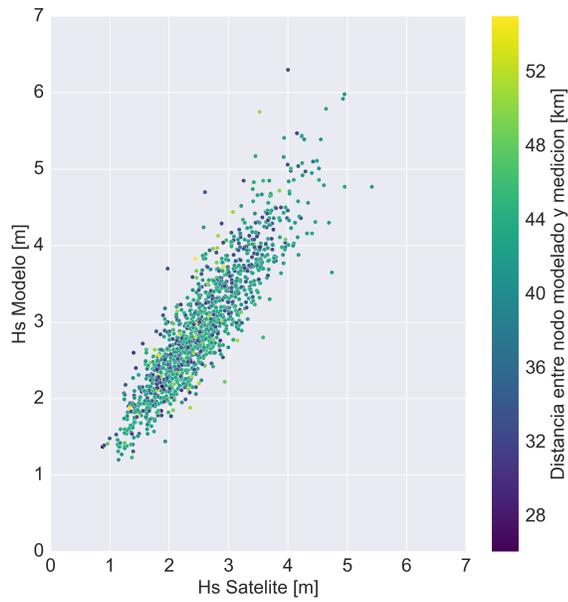


Figura D.3: Nube de puntos caracterizando al distancia entre la medición y el nodo modelado, metodología PROM.

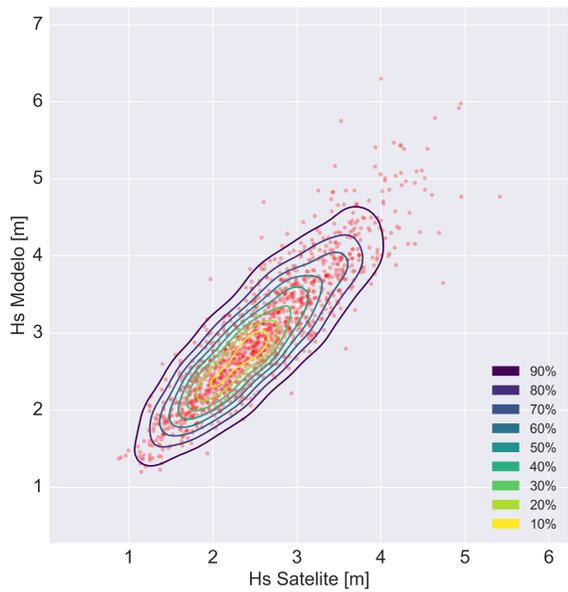


Figura D.4: Distribución de los puntos en regresión lineal, metodología PROM.

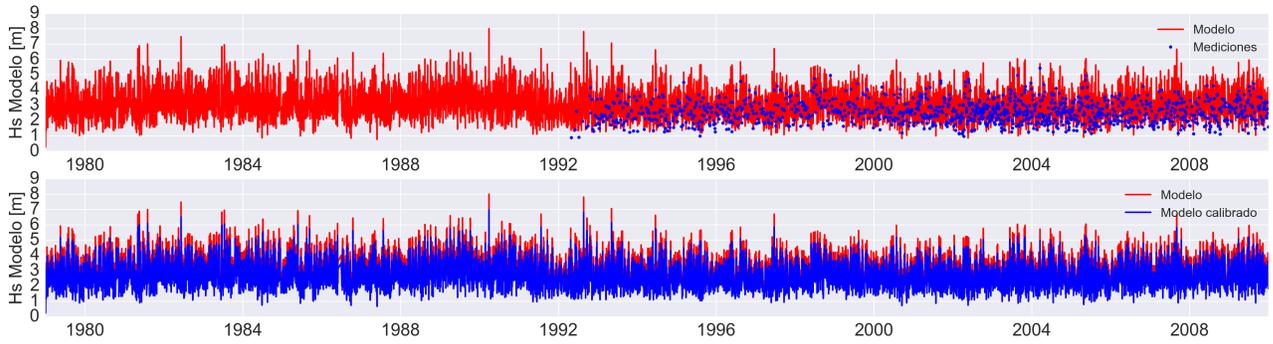


Figura D.5: Modelo calibrado con metodología PROM.

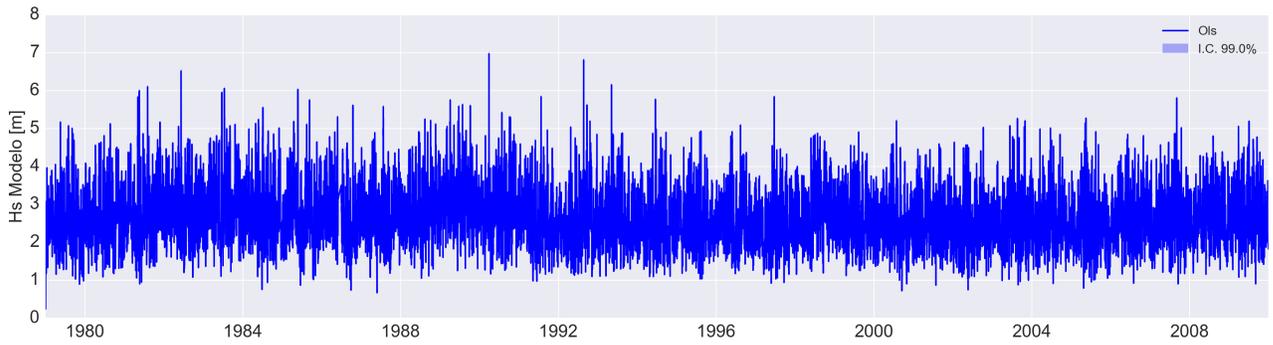


Figura D.6: Familia de ajustes lineales a partir de regresión por cuantiles, metodología PROM.

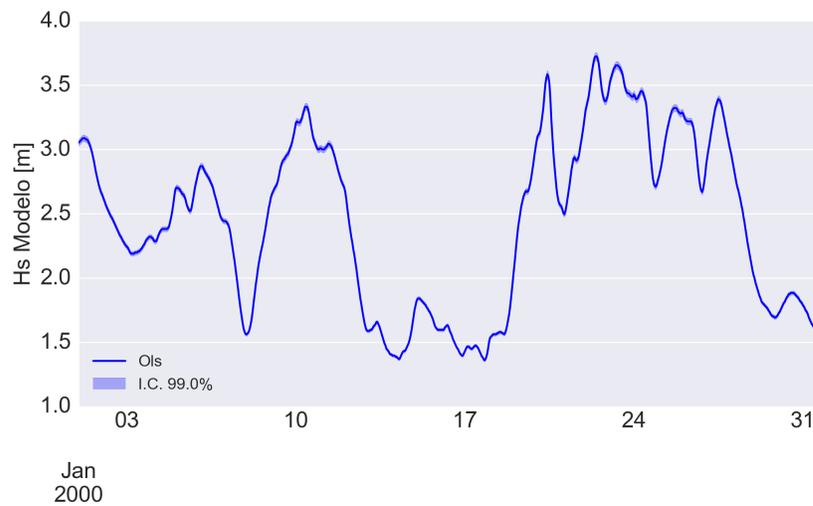


Figura D.7: Familia de ajustes lineales a partir de regresión por cuantiles, Febrero del 2000. Metodología PROM.

Los resultados obtenidos para las demás ventanas espaciales se encuentran disponibles en el repositorio online mencionado en la sección 4.1.1.

E. Calibración paramétrica

En la Figura E.1 se muestra la serie de tiempo del oleaje calibrado mediante la metodología de calibración paramétrica.

Los resultados obtenidos para las demás ventanas espaciales se encuentran disponibles en el repositorio online mencionado en la sección 4.1.1.

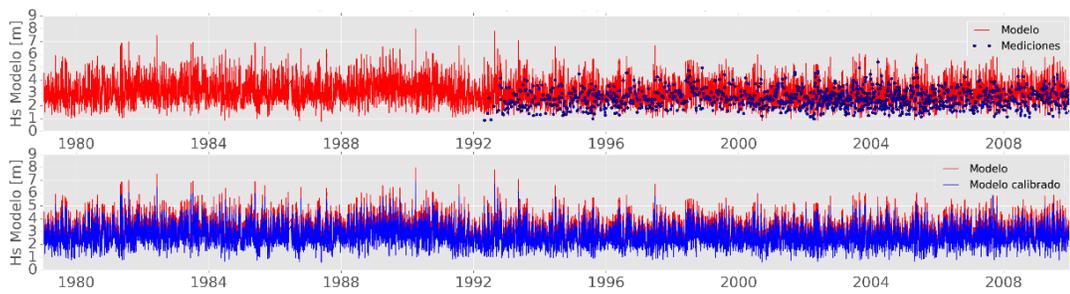


Figura E.1: Modelo calibrado, metodología CP.

F. Regresión por cuantiles

La regresión por cuantiles estima relaciones funcionales para diferentes porciones de la distribución condicional de probabilidades, es una variación del método tradicional que estudia la relación entre variables.

Fue desarrollada en 1978 por Roger Koenker y Gilbert Bassett. Esta técnica, la cual se desarrolló para ser usada en econometría, es una extensión de los modelos lineales para estimar tasas de variación en todas las porciones de la distribución de probabilidades de la variable que quiere ser predicha. La estimación es semi paramétrica en el sentido de que se asumen distribuciones no paramétricas (normal, Poisson, binomial negativa, etc) para la parte aleatoria del modelo, ϵ ; a pesar de que la porción determinística del modelo ($\beta_0 X_0 + \beta_1 X_1$) asume una distribución paramétrica. Los cuantiles condicionales, denotados $Q_y(\tau|X)$, corresponden al inverso de la distribución acumulativa condicional de la variable dependiente, $F_y^{-1}(\tau|X)$, donde $\tau \in [0, 1]$ denota los cuantiles. Por ejemplo, para $\tau = 0,9$; $Q_y(0,9|X)$ corresponde al percentil 90 de la distribución condicional de y con respecto a los valores de X ; en otras palabras, el 90% de los valores de y son menores o iguales a los predichos mediante la variable X .

En la Figura ?? se muestra una figura para continuar con la explicación del método.

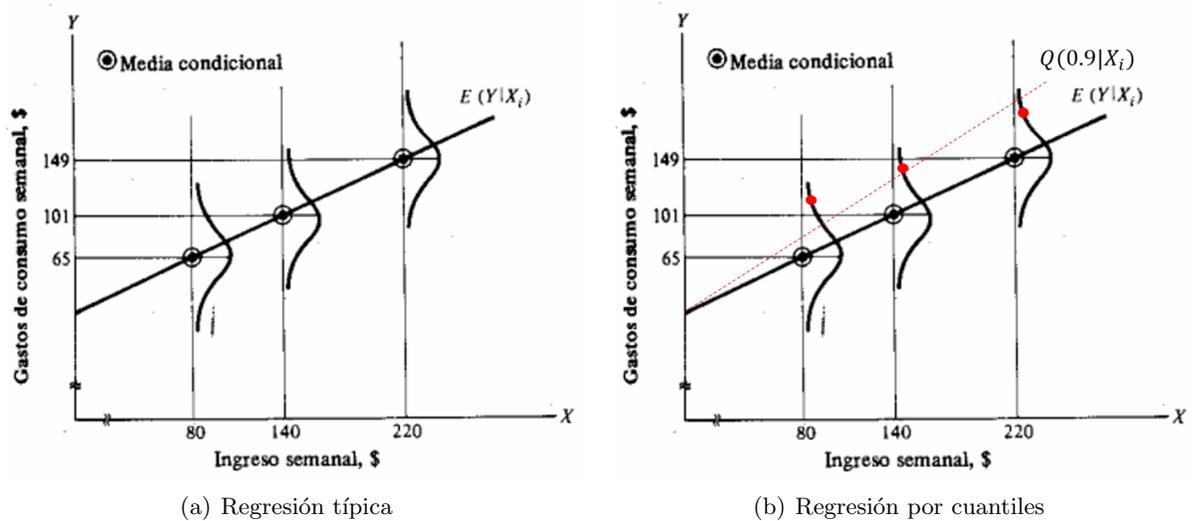


Figura F.1: Regresión por cuantiles.

Fuente: Adaptado de <http://www.econometriaavanzada.com/mmisasarango/quantile.pdf>

En el panel (b) de la figura anterior se puede apreciar que la regresión para el cuantil 0,9; corresponde al mejor ajuste lineal encontrado entre los puntos que corresponden al 90% de la distribución condicional de probabilidad de la variable dependiente.

G. Propagación de oleaje

En proyectos de ingeniería de costas o oceánica es fundamental caracterizar el oleaje en el lugar del proyecto. A falta de mediciones de larga data, generalmente se utilizan datos de modelos de *hindcasting* que son propagados desde aguas profundas hacia las zonas de interés.

Generalmente se utilizan los softwares de aguas someras mencionados en la sección 2.3.

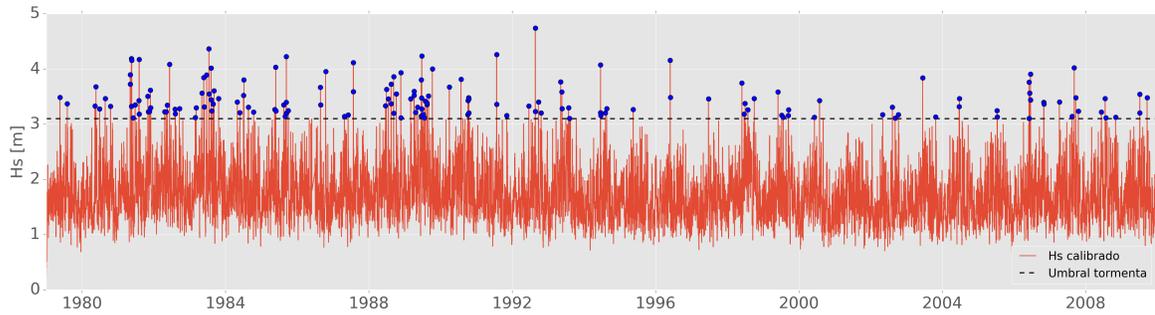
El proceso utilizado en el presente trabajo consistió en propagar alturas unitarias para los casos de periodo y dirección más representativos. Se modelaron periodos desde 4 a 24 s, con un paso de 2 segundos. Para las direcciones se abarcan los cuadrantes III y IV, con un paso de 15° . En resumen, se simularon 143 combinaciones de periodo y dirección.

Para cada caso modelado se obtiene un coeficiente de agitación, k_a , y el valor de la dirección media, D_{med} . Se considera que el periodo no cambia su valor en la propagación hacia aguas someras. La dirección en aguas someras corresponderá al coeficiente D_{med} y la altura, al producto entre k_a y el valor de Hmo del caso correspondiente.

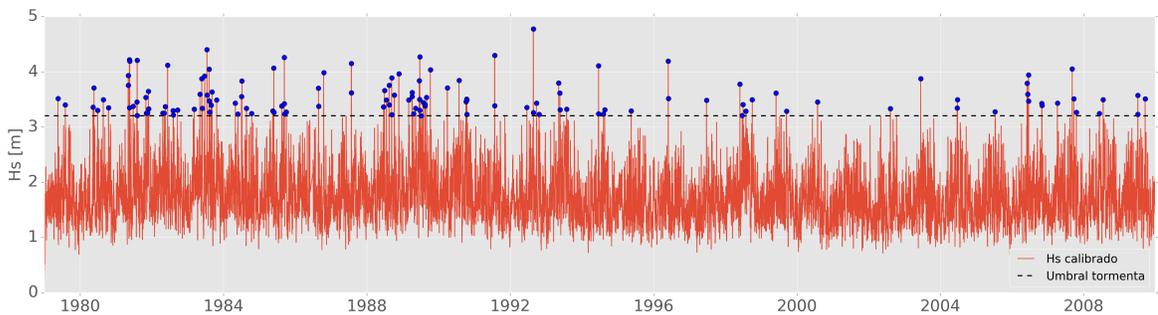
Es habitual que los casos modelados no abarquen la totalidad de periodos y direcciones que se presentan en el clima de oleaje, por lo que se debe realizar interpolación lineal para obtener los coeficientes de los casos no simulados. Mediante esta función de transferencia se pueden conocer las condiciones en aguas someras del clima de oleaje completo.

H. Extensión rompeolas, puerto de Arica

En la Figura ?? se muestra la selección de eventos extremos en utilizada en el cálculo del rompeolas de Arica para ambas envolventes.



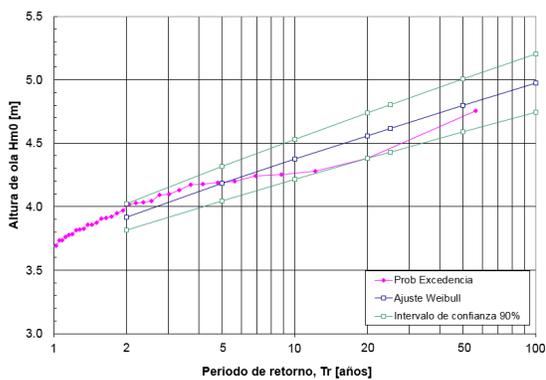
(a) Envoltente inferior



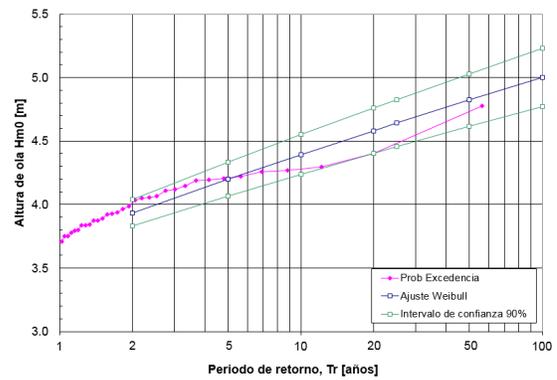
(b) Envoltente superior

Figura H.1: Eventos extremos de climas envolventes, Arica.

En la Figura H.2 se muestra la distribución de probabilidades ajustada a los eventos extremos de los climas envolventes.



(a) Envoltente inferior

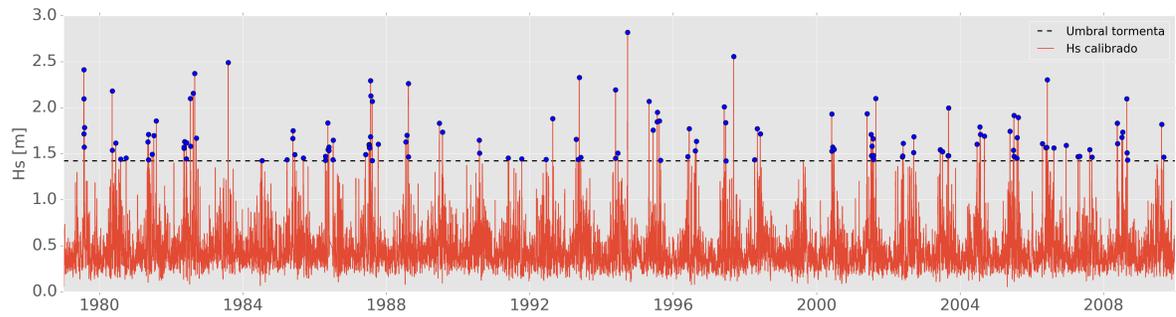


(b) Envoltente superior

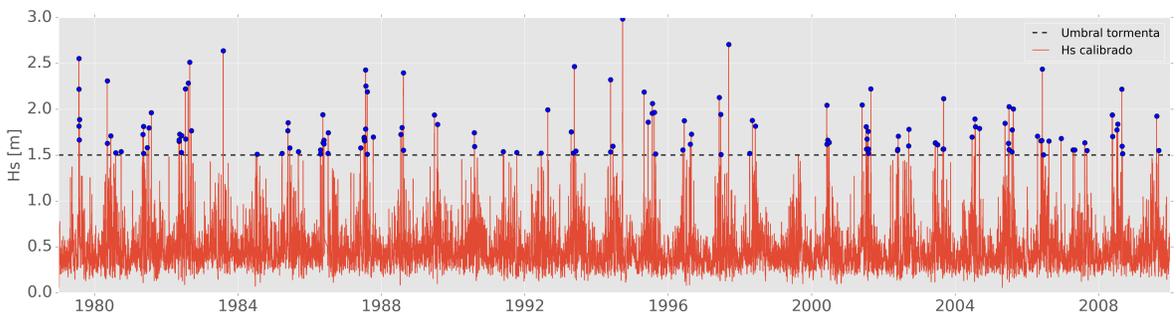
Figura H.2: Ajustes de Weibull climas envolventes, Arica.

I. Esfuerzos sobre pilotes en muelle de descarga de carbón, Coronel

En la Figura ?? se muestra la selección de eventos extremos en el puerto de Coronel.



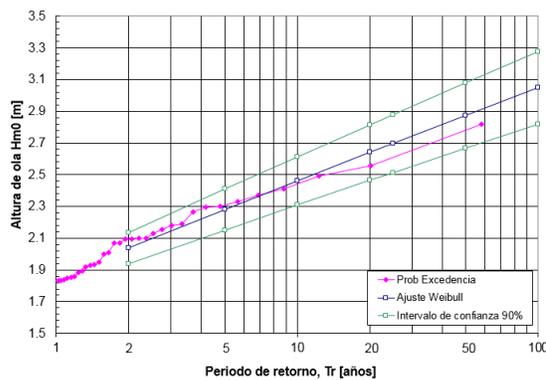
(a) Envoltente inferior



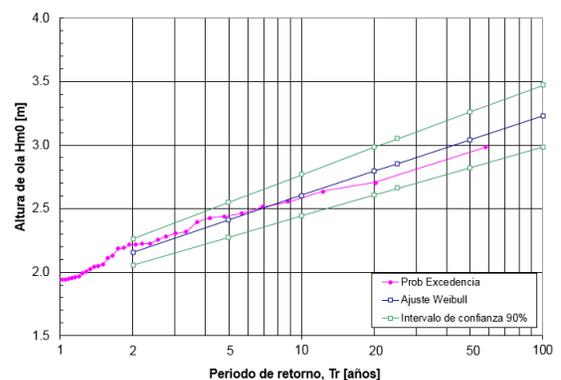
(b) Envoltente superior

Figura I.1: Eventos extremos de climas envolventes, Coronel.

En la Figura ?? se muestra la distribución de probabilidades ajustada a los eventos extremos de los climas envolventes.



(a) Envoltente inferior



(b) Envoltente superior

Figura I.2: Ajustes de Weibull climas envolventes, Coronel.